

UNIVERSITE MONTPELLIER-II

Ecole Doctorale de Biologie Intégrative
AGRO.M

Innovations pour une riziculture en transition : Recherches à l'interface entre l'agronomie et la génétique

Mémoire de titres et travaux scientifiques
présenté en vue d'obtenir

L'Habilitation à Diriger des Recherches

par

Michael Dingkuhn

Responsable de l'équipe Ecotrop
Programme Agronomie, Cirad-amis
UMR-SYSTEM

Montpellier, le 23/06/2003

Devant la commission d'examen composée de :

Président	M Lebrun	Professeur, Université de Montpellier-II
Rapporteurs	H van Keulen	Professeur, Wageningen Agricultural University
	A Ourry	Professeur, Université de Caen
Examineurs	JC Glaszmann	Cirad, directeur de l'UMR Pia
	J Wéry	Professeur, ENSAM, directeur de l'UMR System
	B Ney	Professeur, INA-Paris Grignon

**Innovations pour une riziculture en transition :
Recherches à l'interface entre l'agronomie et la génétique**

Mémoire préparé par

Michael Dingkuhn

Responsable de l'unité propre de recherche No. 59 du Cirad 'Ecotrop'
Coordinateur du projet transversal ORYZON

Soumis à

**L'UNIVERSITE MONTPELLIER-II
Ecole Doctorale de Biologie Intégrative
AGRO.M**

Résumé

Ce mémoire est structuré en trois parties, 1) Travaux de recherche, 2) Perspectives et proposition pour un programme de recherche, et 3) Activités d'enseignement et relations avec le monde professionnel.

La première partie présente mes recherches menées de 1985 à 1998 au sein des centres de recherche internationaux du CGIAR spécialisés sur le riz, d'abord à l'IRRI au Philippines (cas No. 1 : riz irrigué, climat humide), ensuite à l'ADRAO au Sénégal (cas No. 2 : riz irrigué au Sahel, climat aride) et en Côte d'Ivoire (cas No. 3 : riz pluvial). Pour chacun de ces agro-écosystèmes, une analyse agronomique et écophysiological du fonctionnement de la culture à l'échelle du peuplement végétal, intégrant un certain nombre de variétés et pratiques culturales adaptées au milieu cible, mène à la définition de caractères variétaux essentiels pour la performance optimale de la culture. Sur la base d'une approche systémique faisant appel aux modèles écophysiologicals, des idéotypes sont élaborés et proposés comme cible nouvelle pour les généticiens et sélectionneurs. Ces idéotypes sont discutés sur le fond de l'évolution des systèmes rizicoles et des critères de sélection du riz, de la révolution verte (années 60) à nos jours.

Pour le cas No. 1 (Sud-Est Asie), l'idéotype proposé s'adapte aux fortes densités de peuplement associées au semis à la volée, pratique culturale qui remplace progressivement le repiquage pour des raisons économiques. Cet idéotype, dans la suite devenu un concept porteur de l'amélioration génétique dans la sous-région, propose une morphologie de la plante modifiée (tallage, taille des feuilles et des panicules, stockage de réserves intermédiaires dans les tiges, etc.) pour éviter une compétition excessive pour l'azote entre les organes, cause principale de la sénescence précoce observée chez les plantes soumises à une forte compétition entre elles.

Pour le cas No. 2 (riz irrigué au Sahel), la contrainte majeure est le froid affectant le stade plantule ou reproducteur, selon la saison. La stratégie proposée optimise à la fois le choix des dates de semis (objet d'un outil d'aide à la décision, le modèle RIDEV) et des caractères phénologiques de la variété. Cinq constantes génétiques photo-thermiques (températures cardinales et coefficients photopériodiques) ont été élaborées et proposées aux généticiens

comme critères de sélection. Dans la suite, ces outils et concepts ont été mis en œuvre par l'équipe de l'ADRAO, avec comme résultat principal le développement de Sahel 108, variété adoptée par la quasi-totalité des systèmes rizicoles irrigués au Sénégal.

Pour le cas No. 3 (riz pluvial en Afrique de l'Ouest), la contrainte principale identifiée est l'enherbement liée à l'intensification des systèmes, nécessitant une meilleure compétitivité de la variété. Un dispositif expérimental a été proposé pour analyser la compétitivité des génotypes et les caractères morpho-physiologiques y contribuant. Sur cette base, un idéotype fortement compétitif a été proposé. Les germplasmes sources identifiés pour sa réalisation sont des génotypes d'*Oryza glaberrima* (riz 'africain' d'une forte vigueur) et d'*O. sativa* (source de rendements potentiels importants). Dans la suite, des croisements inter-spécifiques, faisant appel aux biotechnologies (culture d'anthères, haplo-diploidisation...), ont généré les variétés 'Nérica', adoptées dans plusieurs pays de la sous région.

Ces résultats s'inscrivent dans la période pré-génomique, ne pouvant pas encore faire appel à aux cartes génomiques moléculaires et aux connaissances de génomique fonctionnelle. Le dernier chapitre de la présentation des travaux de recherche vise donc à transposer ces approches dans notre aire 'post-génomique'.

La 2^{ème} partie du mémoire propose de futures orientations de recherche dans le cadre de l'unité de recherche Ecotrop au sein du Cirad (approches écophysiologiques dans un cadre post-génomique) et de l'UMR System (insertion de la variété dans un contexte intégratif de systèmes de culture). Cette dichotomie, scientifiquement ambitieuse nécessitant des ressources importantes, a été modifiée depuis la soumission du mémoire en faveur de l'approche post-génomique, et en écartant les objectifs de recherche liés aux systèmes de culture. Mon équipe, constituant la nouvelle Unité Propre de Recherche No. 59 'Ecotrop' du Cirad, propose de développer des modèles permettant l'adéquation génotype-milieu aux échelles de l'organe, de la plante et du peuplement végétal. Cette unité pilote également le projet fédérateur ORYZON dont l'objectif est de valoriser la révolution génomique pour la création des variétés de riz plus performantes.

La 3^{ème} partie du mémoire présente un résumé des activités d'enseignement, basées essentiellement sur l'encadrement de nombreuses thèses et autres stages diplômants. Un programme de formations scientifiques pour des jeunes chercheurs (diagnostic de l'état physiologique de la culture, modélisation...) a également été initié en 2001 à Montpellier et en Afrique de l'Ouest, devenu une activité importante grâce à une demande croissante. Le cadre scientifique cohérent de l'UPR Ecotrop, son répertoire grandissant en méthodologies et modèles, et son insertion très visible dans la communauté scientifique internationale constituent une plate forme idéale pour l'accueil des thésards.

Le mémoire s'achève sur la présentation de 10 articles publiés dans des revues scientifiques de rang A, échantillon d'une liste plus importante de publications parues depuis la soutenance de ma thèse en 1985.

SOMMAIRE

CURRICULUM VITAE.....	5
GLOSSAIRE	6
PREMIERE PARTIE : TRAVAUX DE RECHERCHE.....	7
AVANT PROPOS	7
A – INTRODUCTION : OBJET D'ETUDE, CONTEXTE, PROBLEMATIQUE	8
<i>Objet d'étude.....</i>	8
<i>Positionnement dans la dynamique du secteur recherche-développement international.....</i>	8
<i>Le contexte institutionnel</i>	10
<i>Trois écosystèmes, trois transitions agricoles, trois projets de recherche</i>	10
B - BREVE CARACTERISATION DES PROGRAMMES DE RECHERCHE	15
<i>Etape 1 : Riz irrigué en Asie tropicale -- Vers un nouvel idéotype et des itinéraires techniques optimisés pour les systèmes à base de semis à la volée</i>	15
<i>Etape 2 : Riz irrigué au Sahel -- Variétés adaptées et modèles d'aide à la décision pour mieux maîtriser les aléas climatiques.....</i>	21
<i>Etape 3 : Riz pluvial en Afrique de l'Ouest -- Vers un nouvel idéotype pour les systèmes fortement enherbés et limités par la main d'œuvre</i>	25
C – DISCUSSION GENERALE ET SYNTHESE.....	32
<i>Faire de la science dans l'attente d'un impact économique : connaître la demande et les options.....</i>	32
<i>L'évolution des idéotypes de riz : positionnement des travaux</i>	34
<i>L'écophysiologie et la recherche pour le développement.....</i>	37
<i>Ecophysiologie et génomique fonctionnelle : Vision pour un avenir proche ?</i>	38
DEUXIEME PARTIE : PERSPECTIVES ET PROPOSITION POUR UN PROGRAMME DE RECHERCHE.....	39
A - UN MOT SUR MON NOUVEL ESPACE SCIENTIFIQUE.....	39
B - STRATEGIE	40
C - THEMATIQUES SCIENTIFIQUES PRIVILEGIEES	42
D - PARTICIPATION DANS LE MONTAGE D'UNE UNITE MIXTE DE RECHERCHE	43
E - CADRE INSTITUTIONNEL, PARTENARIATS ET MOYENS POUR LA RECHERCHE.....	44
TROISIEME PARTIE : ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT, RELATIONS AVEC LE MONDE PROFESSIONNEL.....	46
A – ENCADREMENT DE PROJETS DE THESE ET DE STAGES DIPLOMANT	46
B - ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT	48
C - RELATIONS AVEC LA COMMUNAUTE SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE.....	49
PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES	50
LISTE DES INTERVENTIONS EN 1^{ER} AUTEUR DANS LES REVUES A COMITE DE LECTURE.....	50
LISTE DE PUBLICATIONS	51

Curriculum Vitae

DINGKUHN Michael, né le 29 novembre 1954, cinq enfants

Chercheur (Ecophysiologiste) du Cirad, responsable de l'équipe de recherche Ecotrop au sein du Programme Agronomie (Cirad-amis), coordinateur de l'Axe-1 de l'UMR SYSTEM à Montpellier.

Coordonnées professionnelles :

Cirad-amis
Programme Agronomie, Equipe Ecotrop
TA 40 / 01, Avenue Agropolis
34398 Montpellier
Cedex 5, France

Tel : 04 67 61 55 64
Fax : 04 67 61 71 19
e-mail : dingkuhn@cirad.fr

Cursus professionnel :

Novembre 1985 - octobre 1990

Chercheur de l'Université de Hambourg basé à l'IRRI (International Rice Research Institute) aux Philippines : CDD dans le cadre d'un projet de recherche mené par la GTZ et financé par le BMZ (ministère fédéré de l'Allemagne pour la coopération)

Novembre 1990 - octobre 1994

"Sénior physiologist" de l'ADRAO (Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest), basé au Sénégal

Novembre 1994 - octobre 1998

Chef du programme riz pluvial de l'ADRAO, basé en Côte d'Ivoire

Novembre 1998 ---

Chercheur (écophysiologie) et responsable de l'équipe Ecotrop au sein du programme Agronomie (Cirad-amis) ; Membre du directoire de l'UMR SYSTEM depuis 2001

Diplômes et titres universitaires :

- 1982 : Diplombiologe (diplôme en sciences biologiques) de l'Université de Hambourg, Allemagne
- 1985 : Doktor der Naturwissenschaften (doctorat en sciences naturelles) de l'Université de Hambourg, Allemagne

Langues :

Français, Anglais, Allemand (lu, parlé, écrit)

Glossaire

ADRAO	Association pour le développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest
ATP	Action Thématique Programmée
CIMMYT	International Maize and Wheat Improvement Center
CIRA	Centre International de Recherche Agricole
ENSAM	Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie à Montpellier
GCRAI	Groupe Consultative de Recherche Agricole Internationale (syn. CGIAR)
IRRI	International Rice Research Institute
ITK	Itinéraire(s) technique(s)
LAI	Leaf Area Index (syn. indice foliaire)
NERICA	New Rice for Africa (idéotype de riz développé par l'ADRAO)
NPT	New Plant Type (idéotype de riz développé par l'IRRI)
ORYZA	Simulateur de la croissance et des rendements du riz développé à l'IRRI
ORYZA_S	Version d'ORYZA développée pour le riz irrigué au Sahel (ADRAO)
PAR	Photosynthetically active radiation (fraction utile du spectre radiatif)
PCP	Pôle de Compétences en Partenariat (investissement stratégique du Cirad sur une base bilatérale)
RIDEV	Simulateur de la phénologie et de la fertilité des épillets du riz irrigué en fonction du microclimat développé à l'ADRAO (Rice DEVelopment)
RSD	Riz semis direct (au lieu de la méthode traditionnelle, le repiquage)
SNRA	Système National de Recherche Agricole
WARDA	West Africa Rice Development Association (syn. ADRAO)

Première Partie : Travaux de recherche

Avant propos

Mes recherches scientifiques sont le résultat d'un apprentissage interdisciplinaire continu, sous l'exigence, de la part des « clients », de produits directement utiles ; et sous ma propre exigence que tout nouveau terrain conquis ou connaissance acquise soient harmonisés avec les antécédents. Mon insistance sur la cohérence, au prix d'une simplification ou schématisation des choses, m'a permis **d'appliquer l'écophysiologie dans les domaines de l'agronomie, puis de la sélection et de l'agro-écologie**. Cette diversification d'approche a certainement été facilitée par la focalisation sur une seule culture, le **riz**, pendant les 13 ans qui séparent la soutenance de ma thèse, en 1985, et mon arrivé au Cirad.

Un résumé de tous mes travaux réalisés depuis 1985 serait difficile à structurer. La présente synthèse fait donc appel à une partie importante mais non exhaustive de ceux ci. **Je me focalise sur le développement de concepts innovateurs pour l'amélioration génétique du riz**, motivé par une évolution rapide des situations agronomique et socio-économique. Il s'agit des travaux écophysiologiques et agronomiques, pour la plupart basés sur des expérimentations au champ, qui reconnaissent la **variété-type** (dans le sens d'un écotype créé ou sélectionné par l'homme) comme composante centrale du système. Pour deux des trois écosystèmes rizicoles étudiés, le résultat principal est un idéotype, proposé comme cible nouvelle pour les généticiens et sélectionneurs.

Parmi les travaux ignorés par ce mémoire sont mes études sur l'adaptation du riz aux stress physico-chimiques, notamment le déficit hydrique et la salinité, ainsi que les recherches à caractère méthodologique réalisées depuis mon arrivé au Cirad, fin 1998.

Les résultats sont généralement présentés comme "mes résultats". C'est évidemment inexact, comme le montre la longue liste d'auteurs de certaines publications citées. En effet, tous les résultats présentés sont issus d'un travail en équipe. Du moins, je m'en suis tenu à ne présenter que des travaux dont j'étais à la fois au minimum co-responsable scientifique et le co-propriétaire intellectuel des concepts développés.

A – Introduction : Objet d'étude, contexte, problématique

Objet d'étude

L'objet d'étude de ce mémoire est l'adaptation biologique de la plante – le riz – à l'évolution des techniques et des systèmes de culture. La diversité d'écotypes de cette espèce et la diversité des agroécosystèmes rizicoles sont uniques, allant des systèmes aquatiques (milieu réducteur) aux systèmes strictement pluviaux (milieu aérobique), des forêts côtières de mangroves aux altitudes supérieures à 2000 m, et de l'équateur aux climats tempérés¹. La diversité des systèmes et itinéraires techniques de production est aussi riche que celle des écotypes, résultat d'une co-évolution poussée par l'homme. En effet, la riziculture est pratiquée de façon très extensive (delta intérieur du fleuve Niger : semis à la volée avant la crue puis récolte par bateau) ou la plus sophistiquée (« Mountain Province » aux Philippines : repiquage à partir d'une pépinière vers des terrasses ayant une gestion d'eau très fine), et en chacun de ces cas le cultivateur a su sélectionner des génotypes adaptés à son système précis.

Pour le sélectionneur et l'agronome modernes (et pour les modélisateurs de ces deux disciplines !), la grande adaptabilité du riz représente à la fois un challenge et une opportunité scientifique. Il se trouve que le riz possède également le plus simple génome parmi les monocotylédonées, le qualifiant comme plante modèle sur les plans biologique et génétique. Bref, le riz se prête parfaitement comme objet d'étude pour ceux qui s'intéressent aux possibilités et limites d'amélioration de la culture, soit avec des moyens agronomiques, génétiques ou les deux.

Les résultats présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans la période pré-génomique (à peine dix ans sont écoulés et on est déjà pleinement dans le « post-génomique » !). Ils visent donc à élaborer des idéotypes, visions idéalisées d'un phénotype mieux adapté et plus performant dans un agroécosystème cible, utilisant les outils classiques de l'écophysiologiste, de l'agronome-modélisateur et (parfois) du généticien. La finalité appliquée de ces travaux exige cependant que ces idéotypes soient définis à la suite d'une analyse rigoureuse de la demande agronomique (sur un fond socio-économique précis), et sur la base de connaissances suffisantes du fonctionnement de la culture et de la diversité génétique disponible.

Positionnement dans la dynamique du secteur recherche-développement international

Les recherches effectuées au cours de la période 1985-1998 qui font l'objet de ce mémoire ont été consacrées à l'étude et au développement de la riziculture dans les pays du Sud. Plus précisément, ils s'inscrivent dans la **période de post-révolution verte**², caractérisée par une re-orientation des recherches agronomiques vers des objectifs de **diversification et de durabilité**, par un nouvel intérêt pour les **écosystèmes cultivés plus marginaux et difficiles**³, et en conséquence par l'adoption progressive d'une **approche systémique**⁴. Sur le plan

¹ Buddenhagen IW, Persley GJ. 1978. Rice in Africa. Academic Press, 356 p.

² Pingali PL, Hosain M, Gerpacio RV. 1997. Asian Rice Bowls. The Returning Crisis? CAB International, 341 p.

³ Greenland DJ. 1997. The Sustainability of Rice Farming. CAB International. 293 p.

⁴ Spedding CRW. 1990. Agricultural production systems. In : Rabbinge R, Goudriaan J, van Keulen H, Penning de Vries FWT, van Laar HH (Eds). Theoretical Production Ecology : Reflections and Prospects. Pudoc Wageningen 1990, , p. 239-248.

disciplinaire et méthodologique, ces recherches sont marquées par l'effort de porter l'écophysiologie dans ses domaines voisins plus appliqués, notamment l'agronomie et l'amélioration variétale.

A l'origine de la révolution verte rizicole en Asie pendant les années 60 se trouve la variété naine **IR8**, créée par l'IRRI⁵. Cette variété, ainsi que les suivantes (notamment IR36, IR64 et IR72), correspondait exactement aux besoins des systèmes et des riziculteurs ciblés : la **maximisation de l'efficacité des choix d'intensification** (intrants, maîtrise parfaite de l'eau, double ou triple culture de riz), dans le cadre d'un système déjà hautement intensifié, situé dans les zones à forte pression démographique en Asie tropicale. La variété **IR8, avec sa bonne réactivité à la fertilisation et un rendement potentiel deux fois supérieur à celui des variétés traditionnelles (10 t/ha en saison sèche), déclenche une dynamique quasiment pré déterminée.**

Ce n'était donc pas vraiment IR8 la cause unique de la révolution verte en Asie, ni la disponibilité de l'urée granulée sur les marchés locaux, mais plutôt la synergie entre une situation démographique et économique favorisant l'intensification des systèmes agraires d'une part, et d'autre part la mise à disposition de toutes les technologies de production correspondant à cette demande. Cette précision, assez profane, nous amène à une conclusion importante : **C'est pendant les grandes transitions des systèmes agraires, les périodes d'évolution rapide ou de mutation, qu'on a besoin de nouvelles technologies agronomiques.** Autrement dit, l'impact potentiel (économique, écologique...) de la recherche agronomique, qui dépend toujours de l'adoption de ses produits par le producteur, est surtout à rechercher pendant les périodes de transition, et dans les environnements affectés par ces transitions.

La recherche agronomique internationale, principalement représentée par les centres du GCRAI, euphorisée par leurs grands succès pendant la **révolution verte** dans le cas du riz (IRRI, ADRAO) et du maïs (CIMMYT), n'a pas toujours respecté cette logique dans ses stratégies. L'IRRI, focalisant ses recherches au cours des années 70 et 80 (en partie) sur l'augmentation du potentiel génétique du riz et sur l'efficacité de l'azote minéral, n'a pas pu réaliser ses deux grands objectifs stratégiques: la **généralisation de la révolution verte** (en Inde, en Thaïlande, en Afrique...) et l'**augmentation des rendements potentiels** au-delà du niveau déjà atteint avec IR8 dans les années 60⁶. Les concepts de la révolution verte étaient arrivés aux limites de leur domaine d'extrapolation et de validité.

Pendant les années 80 et 90 se manifeste progressivement une re-orientation des CIRA vers les systèmes non irrigués ou agro-écologiquement défavorisés, et vers les systèmes diversifiés. Les choix adaptés à un milieu socio-économique et écologique spécifique remplacent la recette unique ou générique (entrée d'ailleurs plus proche des préoccupations et stratégies de la recherche agronomique française, représentés par le Cirad et l'IRD pour les environnements tropicaux⁷). On note une plus forte intégration entre les centres de recherche internationaux (projets et initiatives transversaux), une redéfinition de leur partenariat avec les systèmes nationaux de recherche agricole et de recherche-développement (consortia, réseaux

⁵ Peng S, Cassmann KG, Virmani SS, Sheehy J, Khush GS. 1999. Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential. Crop Sci. 39, 1552-1559.

⁶ Horie T. 2001. Increasing yield potential in irrigated rice : breaking the yield barrier. In : Peng S and Hardy B (Eds). Rice Research for Food Security and Poverty Alleviation, p. 3-26. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines. 692 p.

⁷ Malézieux E, Trébuil G, Jaeger M. 2001. Modéliser les agroécosystèmes. In : Malézieux E, Trébuil G, Jaeger M (Eds). Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision. CIRAD et INRA, Montpellier, p. 17-36.

de recherche...), et de nouvelles exigences de la part des bailleurs de fonds (démonstration quantitative de l'impact économique des recherches réalisées). Expression d'une crise de confiance ou d'un nouveau réalisme ? L'impact de ces nouvelles stratégies, probablement moins spectaculaire que celui de la révolution verte mais plus écologique et plus sensible à la demande locale, reste à apprécier.

Dans ce contexte historique, les études présentées dans ce mémoire visent à ajuster le concept fondamental de la révolution verte (un nouvel idéotype pour une situation agronomique et socio-économique nouvelle) aux challenges modernes que rencontre le monde rizicole. Cette adaptation cherche à éviter les échecs du passé en s'appuyant sur l'analyse non seulement des contraintes liées au milieu biophysique, mais également sur une analyse et un diagnostic de l'évolution locale des systèmes agricoles.

Le contexte institutionnel

Les spécificités du contexte et du fonctionnement des CIRA où mes travaux ont été réalisés méritent un rappel rapide. Regroupés sous le chapeau du GCRAI qui veille à leur performance, confirme leurs stratégies et plans de travail, et coordonne la répartition des fonds fournis par un consortium international de bailleurs (souvent fléchés vers des centres spécifiques), ces centres gardent néanmoins une autonomie importante et une culture « maison » spécifique. Ni publics ni privés, les centres dépendent entièrement de la fidélité de « leurs » bailleurs de fonds, sans aucune garantie de pérennisation. Cette réalité se fait sentir dans la vie quotidienne de ces centres et de ses chercheurs, dans leur fonctionnement et dans leur culture. Par rapport à la recherche académique, les projets de recherche des CIRA sont caractérisés par...

- leur **finalité** très explicite et leur insertion dans une stratégie et un plan de travail multi-annuel du centre
- l'obligation de la **pluri-disciplinarité**
- la **bi-polarité siège-terrain**
- l'investissement lourd et continu dans l'**évaluation** et la **promotion** des résultats
- le rapport très élevé entre l'effectif **technique** (souvent le plus qualifié d'un pays hôte plutôt pauvre) et l'effectif **scientifique** (recruté sur un plan international)

Une caractéristique partagée par la recherche universitaire et celle des CIRA, par contre, est la nécessité de réaliser et maintenir un **niveau d'excellence** qui s'exprime dans une forte production de **publications scientifiques** dans les meilleures revues.

Trois écosystèmes, trois transitions agricoles, trois projets de recherche

L'objectif de mes projets au sein des centres internationaux de recherche agricole (CIRA) était de contribuer à l'**amélioration de la productivité de la riziculture**, dans la finalité générale d'une "**intensification durable**" [72]. Il s'agissait de fournir aux agronomes et sélectionneurs des outils de recherche pertinents et performants. Chacune de ces étapes durant 4-5 ans (Philippines, Sénégal, Côte d'Ivoire) porte sur un milieu bio-physique et socio-économique distinct (Tableau 1).

Malgré la grande diversité des contraintes biophysiques et économiques on note un fond commun à toutes les situations agricoles étudiées : **généralement la culture ou le système de cultures sont confrontés à une évolution rapide des facteurs socio-économiques**. Comme constaté précédemment, ces facteurs constituent le moteur de l'évolution des systèmes de cultures. La croissance démographique, l'accès au marché, le coût de la main d'œuvre affectent profondément les décisions de l'agriculteur⁸. Celui-ci, ne disposant que d'un choix très limité de technologies « traditionnelles » ou « introduites » (matériels génétiques, intrants, modes de gestion du terrain et des cultures...), **adapte sa démarche aux nouvelles réalités économiques**. Une adaptation souvent imparfaite et déstabilisante pour l'agro-écosystème...

Tableau 1 : Projets de recherche menés sur le riz

	Pays/région	Ecosystème / Syst.de culture	Zone climatique	Contraintes socio-économiques	Contraintes biophysiques
Projet 1985-1990	Philippines / Sud-Ouest Asie	Irrigué (secteur informel), riz double culture	Moussons (Chaud-humide)	Coût de la main d'œuvre	Adventices, Parasitisme
Projet 1990-1994	Sénégal / Sahel	Irrigué (grands périmètres), monocult. de riz double ou simple	Sahel (aride)	Coûts des aménagements, de la main d'œuvre et de l'eau ; désengagement des organismes publiques	Froid, chaleur, salinité, adventices
Projet 1994-1998	Côte d'Ivoire / Afrique de l'Ouest	Pluvial, cultures diverses en rotation avec des jachères	Savanes et forêts tropicales	Coût de la main d'œuvre, indisponibilité des intrants, accès aux marchés	Adventices (fonction de la durée des jachères), sécheresse

C'est cette déstabilisation, liée à la transition d'un ancien à un nouveau système, qui constitue la plus grande opportunité d'impact pour la recherche agricole, pour deux raisons. La première est que l'agriculteur, normalement conservateur, est obligé de modifier son comportement. La seconde est que le chercheur, grâce à son raisonnement analytique et sa capacité d'extrapolation, possède dans ce cas précis une compétence comparative par rapport à l'empirisme de l'agriculteur. Sous un angle purement scientifique on note également que ces situations agronomiques très fluides donnent au chercheur une opportunité de faire des découvertes et de développer des solutions innovatrices, **car le dysfonctionnement d'un système dévoile souvent le fonctionnement de ses éléments**.

Les transitions agricoles constatées dans les trois systèmes étudiés provoquent des modifications importantes dans le comportement de l'agriculteur (ajustements), reflétées dans ses choix techniques. J'en ferai une caractérisation très sommaire :

⁸ Pingali PL, Binswanger HP. 1988. Population density and agricultural intensification : a study of the evolution of technologies in tropical agriculture. In : Johnson D, Gale D, Lee RD (Eds). Population Growth and Economic Development – Issues and Evidence. University of Wisconsin Press, London.

Cas No. 1 (Systèmes irrigués en Sud-Est Asie) :

- **Transition agricole :** Confrontation des systèmes hautement intensifiés, et utilisant beaucoup de main d'œuvre pour le repiquage et le désherbage, à une chute brutale de la disponibilité de celui-ci et une augmentation de son coût (tendance lourde aux Philippines depuis le début des années 80). On observe cette tendance dans la plupart des pays d'Asie et aussi en Afrique.
- **Réponse des agriculteurs :** passage du repiquage (méthode traditionnelle) au semis "direct" (à la volée ou en ligne, à sec ou pré germé...). Associées à ce choix technique l'utilisation généralisée des herbicides (incontournable pour le semis direct à cause d'une pression plus forte d'enherbement⁹) et la mécanisation à petite échelle, adaptée à la petite taille des parcelles¹⁰. On peut dire que les systèmes de production rizicole asiatique se rapprochent de leur équivalent dans la zone tempérée, à l'exception de la taille des parcelles, qui reste moindre.
- **Problématique :** Le passage du repiquage au semis direct provoque une pression très forte des adventices, nécessite un nivelage de la parcelle et une gestion de l'eau plus fines en début de cycle¹¹ et modifie la géométrie et l'architecture du couvert. Les problèmes d'ajustement d'itinéraire technique et de choix de variété se posent [56]. Pour cette zone très peuplée du monde, où le terrain et l'eau d'irrigation deviennent de plus en plus chères, la question des rendements potentiels se pose également.

Cas No. 2 (agro-écosystème aquatique-irrigué dans les vallées des grands fleuves du Sahel) :

- **Transition agricole :** De la culture extensive de décrue à la culture irriguée sur des périmètres semi-publics (aménagement des périmètres depuis les années 70). Cette transition introduit un conflit entre les calendriers rizicoles (surtout pour la double culture de riz) avec les calendriers de production pluviale (sorgho, mil, arachide...), souvent cultivés par les mêmes producteurs. Cela nécessite une plus grande flexibilité des calendriers rizicoles que prévu par les aménageurs des périmètres irrigués. De plus, et parallèlement, intervient le problème de la libéralisation de la filière rizicole et de la gestion des eaux et terres, entraînant une crise des services de vulgarisation et d'appui technique (années 90)¹².

⁹ Caton BP, Hill JE, Mortimer AM, Foin TC, Lubigan RT. 2002. Canopy development of direct-seeded rice and some important grass and sedge weeds in response to water management. *Agric. Forest Meteorol.* 111, 39-53.

¹⁰ Erguiza A, Duff B, Khan C. 1990. Choice of rice crop establishment technique : transplanting vs direct-seeding. *IRRI Res. Pap. Ser.* 139. 10p.

¹¹ Takeuchi H, Sekiguchi K, Kitagawa I, Takenaka H. 2002. Requirement for field leveling using laser leveler machine on direct seeding culture of paddy rice. *Bull. Hokkaido Prefectural Agric. Exp. Stations* 83, 55-58.

¹² Dia I. 1995. Performances des organisations paysannes et désengagement de l'état. In : Boivin P, Dia I, Lericollais A, Poussin JC, Santoir C, Seck SM (Eds). *Nianga, Laboratoire de l'Agriculture Irriguée en Moyenne Vallée du Sénégal*. Editions de l'ORSTOM, Paris, p.497-512.

- **Réponse des agriculteurs :** Gestion à tendance extensive d'un système conçu pour la production intensive (une seule culture par an au lieu de la double culture, irrigation informelle souvent inefficace) ; non respect des ITK recommandés (intrants et calendriers). Les résultats sont des rendements très variables et une dégradation des terres¹³ (salinisation) et des infrastructures d'irrigation¹⁴.
- **Problématique :** Pour trouver une place durable dans les activités agricoles de la région, à côté des cultures pluviales, la riziculture irriguée doit donner des rendements plus stables (et assez élevé pour être rentable), tout en permettant des calendriers de culture plus flexibles.

Cas No. 3 (agroécosystème pluvial en zones des forêts et savanes en Afrique de l'Ouest)

- **Transition agricole :** La pression démographique dans les zones des savanes et des forêts provoque une intensification déstabilisante des systèmes de culture à base du riz. La transition des systèmes extensifs aux systèmes intensifiés est associée à une augmentation forte de l'indice cultural (nombre de cultures par an) de 0,1-0,3 à 1, qui n'est pas accompagnée par des mesures conservatrices. Cette dynamique se fait surtout sentir dans les zones rurales ayant un accès privilégié au marché (proximité des routes). Elle est moins déstabilisante à proximité de villes (zones péri urbaines) grâce à la bonne disponibilité des intrants et de la main d'œuvre.
- **Effets et ajustements observés :** La diminution des périodes de jachère accroît la pression des adventices et provoque une dégradation des ressources naturelles¹⁵. La chute inévitable des rendements et de la productivité de la main d'œuvre¹⁶ augmentent la pauvreté rurale, provoquent la migration de cette population vers les villes, et accélèrent encore la dégradation des écosystèmes (fertilisation insuffisante, mise en culture des zones marginales et fragiles...).
- **Problématique :** Il s'agit essentiellement de mettre à la disposition du cultivateur des technologies permettant une meilleure productivité de la main d'œuvre. Cette meilleure productivité créera les marges économiques nécessaires pour un investissement minimal dans la maintenance de la fertilité des terres.

¹³ Bertrand R, Keita B, N'Diaye MK. 1993. La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sub-sahariennes (cas de l'Office du Niger au Mali). Cahiers Agricultures 2(5), 318-330.

¹⁴ Le Gal PY. 1997. Le développement de la double culture irriguée au Sahel : contraintes et perspectives pour l'agriculteur. In : Miezani KM, Wopereis MCS, Dingkuhn M, Deckers J, Randolph TF (Eds). Irrigated Rice in the Sahel : Prospects for Sustainable Development. West Africa Rice Development Association, Bouaké, Côte d'Ivoire, p. 161-184.

¹⁵ Akanvou R, Becker M, Chano M, Johnson DE, Gbaka-Tcheche H, Touré A. 2000. Fallow residue management effects on upland rice in three agroecological zones of West Africa. Biol. Fert. Soils 31, 501-507.

¹⁶ La production par unité de surface de sol (rendement syn. productivité du terrain) exprime mal la performance du système là où l'accès au terrain n'est pas un facteur limitant. Dans les systèmes agricoles extensifs en Afrique de l'Ouest, la production par unité de main d'œuvre investi (productivité de la main d'œuvre) est souvent l'indicateur de performance le plus important [72].

Ces trois situations nécessitent, chacune, des contributions spécifiques de la recherche agricole sous forme de nouvelles variétés et de techniques culturales, avec une urgence croissante du cas No. 1 au cas No. 3, fonction des risques de dégradation irréversible des terres et terrains concernés. Mon rôle était de fournir des solutions partielles, en collaboration avec des agronomes et sélectionneurs, à partir d'une analyse du fonctionnement de la culture face aux contraintes liées à la gestion et au milieu. Conformément aux mandats des CIRA orientés sur une culture donnée (le riz dans le cas de l'IRRI et de l'ADRAO), et du fait que le riz est la seule culture majeure adaptée au milieu aquatique, ces recherches se sont relativement peu intéressées aux systèmes de cultures (rotations, associations...), mais plutôt aux **interactions entre le génotype** (la variété, l'écotype, l'idéotype), **l'environnement biophysique** et **les interventions du producteur** (pratiques culturales).

Dans les chapitres suivants nous présenterons brièvement les approches adoptées et les résultats obtenus au cours de ces trois étapes de recherche, et une discussion générale qui nous donnera en synthèse une opportunité de revenir au concept des transitions agricoles et à leur signification pour la recherche agronomique.

B - Brève Caractérisation des programmes de recherche

Etape 1 : Riz irrigué en Asie tropicale -- Vers un nouvel idéotype et des itinéraires techniques optimisés pour les systèmes à base de semis à la volée

Enjeux et objectifs

Le repiquage du riz dans un sol en conditions d'anaérobiose et couvert par une lame d'eau est probablement la plus efficace et durable méthode d'évitement des adventices jamais développée. Sa substitution progressive en Asie et ailleurs dans le monde par le semis direct (SD), motivée par le coût croissant de la main d'œuvre agricole, est devenu possible grâce à la disponibilité de nouveaux herbicides plus efficaces. Mais les mauvaises herbes ne constituent pas le seul problème lié à ce choix technique, particulièrement quand il s'agit de maintenir un niveau très élevé de rendement : **Sous SD, la gestion de l'eau est plus délicate, la gestion de l'azote doit être ajustée, et on doit se demander si les variétés existantes vont s'adapter sans perte aux géométries et densités différentes et plus hétérogènes du peuplement végétal.**

Pour répondre à ces questions, les agronomes et sélectionneurs de l'IRRI font appel à l'appui de l'écophysiologiste. **L'objectif est d'évaluer les conséquences du passage du repiquage au SD sur le fonctionnement de la plante, du peuplement et du champ cultivé ; d'élaborer des stratégies d'adaptation des ITK ; et enfin d'évaluer la nécessité éventuelle d'ajuster les critères de sélection variétale.**

Démarche

Un grand nombre d'essais ont été menés dans des périmètres irrigués près de Los Baños et de Muñoz (Philippines) pour analyser le comportement du riz sous différents itinéraires techniques à base du repiquage ou du semis direct.

Les essais sur le semis direct utilisent la méthode de « démarrage en humide » (semences pré germées sur sol pré-irrigué). Les pratiques alternatives, notamment le « démarrage à sec » généralement associé à un haut niveau de mécanisation, n'ont pas été testées. **Trois géométries différentes ont été comparées (semis à la volée, en ligne ou en poquet)**, en partie sur station et dans des parcelles paysannes (gestion par le chercheur). L'azote a été appliqué sous forme d'urée à différents niveaux, fractionnements et méthodes d'application (à la volée, incorporation dans le sol, injection liquide dans le sol ou pulvérisation).

L'analyse de la croissance prend en compte la **dynamique de la biomasse** formée et de **l'azote** absorbé, ainsi que leur répartition entre les organes. Les cinétiques du **tallage**, de l'avortement des talles et de la **sénescence des feuilles** sont également mesurées. A maturité le rendement est caractérisé par toutes ses composantes (nombre et taille des panicules, poids de mille grains, taux de stérilité...) ainsi que l'indice de récolte. A cette gamme de variables plutôt agronomiques s'ajoutent des mesures du **taux d'échange de CO₂ du couvert** et de la lame d'eau (chambres transparentes et mobiles, enfermant le couvert pendant 30s pour observer la chute de la concentration du CO₂), **pour relier la structure du couvert et son état azoté au taux d'assimilation**. Les résultats sont utilisés pour la conception d'un **idéotype** spécifiquement adapté au semis direct, à l'aide du modèle L3QT (modèle issu de l'école de Wageningen, précurseur d'ORYZA, simulant le couvert en 3 couches).

Principaux résultats

Passage du repiquage au semis direct : la biomasse explose, les rendements restent inchangés

La différence la plus frappante entre le riz SD et repiqué à 20 j est la forte croissance végétative observée sous les conditions de SD [37, 38]. Il s'agit en partie d'un effet de la densité du peuplement, mais, comme le montre une comparaison entre les deux méthodes d'installation en gardant les même géométrie et densité, on constate également un effet très fort d'un choc physiologique lié au repiquage [13]. On note **un retard phénologique de 7 j** provoqué par ce choc (initiation paniculaire, floraison) **et une inhibition du tallage et de la photosynthèse à l'échelle du couvert pendant plus de 14 j** (cette dernière observation confond certainement une inhibition de l'échange gazeux avec un retard d'expansion des feuilles). En conséquence, le riz repiqué perd au moins une semaine au niveau de son développement et deux semaines au niveau de la croissance.

Les conséquences du développement végétatif supérieur du riz SD sont étonnantes. Un niveau important de la photosynthèse du couvert est vite atteint (50% de la valeur maximale à 32 JAS au lieu de 50 JAS chez le riz repiqué), mais cette croissance rapide est accompagnée par une **chute forte de la teneur en azote des feuilles**. Cette carence s'exprime par **une chute effective de la photosynthèse vers la fin de la phase juvénile** (55 jas ou 825 °Cj chez la variété étudiée, IR64), période conseillée du deuxième apport d'azote. On constate également que **le riz SD émet 60% plus de talles** par unité de surface que son équivalent repiqué, mais que cette différence tombe à 20% à floraison à cause d'une **vague d'avortements** entre l'initiation paniculaire et la floraison -- beaucoup plus marquée chez le riz SD que chez le riz repiqué.

Au niveau du **rendement** on n'observe aucune différence entre les traitements malgré une photosynthèse cumulée et une biomasse aérienne finale très supérieure chez le riz SD. Par contre, on observe une différence importante au niveau de **l'indice de récolte** : 0,43 chez le riz SD par rapport à 0,51 obtenu avec repiquage. On peut se poser la question si, sous une gestion agronomique plus adaptée aux spécificités du riz SD, il n'existerait pas une marge importante pour l'amélioration des rendements.

L'impact de la méthode de plantation est plus marqué chez les variétés précoces

Une comparaison entre des variétés ayant une durée du cycle différente, mais une architecture et une base génétique très similaires, montre que l'effet du passage du repiquage au SD est plus marqué chez les variétés précoces que chez les variétés tardives [15]. En allongeant le cycle de végétation de 100 j à 140 j sous des conditions optimales de culture (saison sèche bien ensoleillée, températures proches de l'optimum physiologique, irrigation, apports d'azote non limitants), on note que les rendements restent inchangés (entre 8 et 9 t/ha) mais la biomasse sèche finale monte de 14 t/ha (variété précoce) à 19 t/ha (cycle long). L'effet marqué du SD (par rapport au repiquage) sur la production de biomasse (chapitre précédent) se manifeste clairement chez la variétés précoce mais pas chez la variété la plus tardive. **On note une certaine similarité entre les effets du SD (par rapport au repiquage) et le choix d'une variété tardive (par rapport à une variété précoce) : La biomasse augmente et l'indice de récolte chute.** Ces deux phénomènes sont associés à une phase de croissance

linéaire plus longue (chez le riz SD elle commence plus tôt, chez la variété tardive elle termine plus tard) et une sénescence foliaire plus marquée vers la fin du cycle.

Ces résultats nous amènent à une question qui a préoccupé les chercheurs de l'IRRI depuis la réalisation de nos recherches : comment convertir un gain de biomasse végétative (résultat du SD ou d'un cycle plus long) en grains ? Autrement dit, **comment maintenir un indice de récolte élevé (>0,5) dans une culture à forte productivité de biomasse ?**

Carence en azote et sénescence précoce -- deux handicaps liés à une forte croissance

L'étude des cinétiques de la biomasse aérienne [13, 38] et de la photosynthèse à l'échelle du peuplement [14] montre que l'accumulation d'une biomasse importante avant floraison provoque un ralentissement de la croissance (même une croissance négative) après la floraison. Il est désormais connu que l'indice de récolte dépend beaucoup de la biomasse produite APRES floraison (Tanaka *et al.*, 1966¹⁷), et qu'une mobilisation des réserves carbonées, même si elles sont abondantes, ne compense que très partiellement un manque d'assimilats "frais" [22].

Le ralentissement de la croissance vers la fin du cycle chez le riz SD est associé à une carence en azote dans les feuilles (effet d'une dilution excessive, [14, 37]) et un déclenchement précoce de la sénescence, bien avant la floraison [15]. En conséquence, un apport plus tardif de l'urée (fractionnement 1/3-2/3 au lieu de 2/3-1/3) permet d'augmenter l'indice de récolte et le rendement du riz SD [37, 39]. Conclusion principale issue de toute une série d'études [14] : L'indice de récolte faible chez le riz SD est surtout dû à une dilution de l'azote absorbé (provoquant une carence au niveau des feuilles), et non à un excès de biomasse ou une faible absorption en azote *per se*.

Un troisième handicap physiologique, la respiration excessive liée à une surproduction végétative, nous semble moins important. Une étude au champ montre clairement que la respiration du couvert est liée à la quantité d'azote absorbée, et non à la biomasse sèche [31]. Le riz SD, n'absorbant pas forcément plus d'azote que son homologue repiqué, ne respire donc pas plus que celui-ci.

Existe-t-il un indice foliaire optimal pour le riz irrigué ?

Le concept d'un indice foliaire (LAI) optimal est controversé, en partie parce que la valeur optimale dépend fortement du critère de son optimisation (photosynthèse ou taux de croissance, économie d'eau, rendement...). Une étude de maximisation de la photosynthèse du couvert en optimisant le LAI pour différents niveaux d'azote absorbé, basé sur des expérimentations et modélisations fonctionnelles [14], propose un LAI_{opt} de 4,5 pour des couverts relativement riche en azote (>30 kg N / ha dans les feuilles), et un LAI_{opt} inférieur à 4,5 pour des couverts aux teneurs en azote plus faibles. Au delà du LAI_{opt}, la photosynthèse du couvert (par unité de surface de sol) décroît sensiblement. Toutes les variétés de riz testées

¹⁷ Tanaka A, Kawano K, Yamaguchi J. 1966. Photosynthesis, respiration, and plant type of the tropical rice plant. International Rice Research Institute, Tech. Bulletin No. 7.

dépassent ce LAI_{opt} , et produisent donc un LAI excessif (par rapport à l'objectif de maximisation du taux de croissance), pendant la deuxième partie de leur cycle (phases reproductrices et de maturation). On note pourtant que ce phénomène est plus marqué chez le riz SD dont le LAI maximal se situe souvent entre 8 et 12 (conditions optimales de gestion et alimentation). **Nous pouvons donc conclure que la dilution excessive de l'azote absorbé chez le riz SD est surtout un résultat d'une production excessive de surface foliaire.**

Stratégies d'optimisation agronomique : vers une meilleure gestion de l'azote

On constate donc que les variétés de riz étudiées, généralement sélectionnées sous culture repiquée, montrent une surproduction de surface foliaire par rapport à l'azote absorbé, particulièrement quand le choc de repiquage est absent. Sur le plan agronomique, quelle marge de manœuvre pour corriger ce comportement estimé inefficace ?

Le problème étant lié aux cinétiques de croissance et de répartition de la biomasse et de l'azote entre les organes, une optimisation agronomique va surtout concerner la gestion de la compétition pour la **lumière** (structure du peuplement : géométrie et densité) et pour **l'azote** (fractionnement des doses d'engrais) .

Optimisation de la structure du peuplement. Le semis à la volée, la forme la plus pratiquée et économique du SD, donne peu de flexibilité au niveau de la densité, et aucune sur le plan de la géométrie du peuplement. Généralement on sème à une densité supra-optimale pour compenser des taux forts de mortalité dus aux submersions ou manques d'eau locaux. Une diminution sensible de la densité du semis est possible avec la mécanisation du nivelage (ex : à laser) et avec une gestion très fine de l'eau en début de culture. Ces options sont cependant rarement réalisables pour le petit producteur en Asie et n'ont pas été étudiées dans le cadre de mes travaux. Par contre, le semis mécanisé en ligne utilisant un appareil développé à l'IRRI [14, 38] a été comparé avec le semis à la volée (plus forte densité) et le semis manuel en poquets imitant la géométrie du riz repiqué [13]. Les résultats montrent que la forte régulation du tallage (avec une phase très variable d'avortements) limite l'impact de la densité et la géométrie du peuplement sur le rendement [15, 37]. **Les rendements légèrement supérieurs chez le riz semis en ligne ou poquet, par rapport au riz semis à la volée avec ses densités souvent supra-optimales, ne justifient donc pas une mécanisation coûteuse.**

Optimisation de la gestion de l'azote. Nous avons étudié les effets d'une pondération variable des différents apports d'azote (optimisation du fractionnement) [37], d'un apport supplémentaire en phase de reproduction [17, 18], d'une technique nouvelle d'application d'urée minimisant les pertes de volatilisation (injection d'urée liquide dans le sol entre les lignes) [39] et enfin d'une pulvérisation d'urée en solution liquide directement sur le couvert (problème d'absorption limité par les racines en stade de reproduction) [17]. **Les meilleurs résultats ont été obtenus par les traitements qui "simulent" le comportement du riz repiqué : limitation de la croissance en phase juvénile, apports d'urée en stades avancés pour augmenter la photosynthèse post-florale et pour reporter le déclenchement de la sénescence. Les meilleurs itinéraires techniques pour le riz SD (densité, gestion de l'azote) donnent des rendements supérieurs par rapport au riz repiqué, mais toujours un indice de récolte significativement inférieur, et donc, un taux de conversion plus faible que celui obtenu dans le système classique repiqué.**

Vers un nouvel idéotype de riz adapté aux peuplements denses

Le fait que le riz SD n'atteint jamais le niveau de l'indice de récolte observé chez le riz repiqué nous mène à conclure que sous les conditions de SD, les variétés testées ne réalisent pas les rendements potentiels. Autrement dit, **une marge nous semble exister pour l'augmentation des rendements du riz irrigué en adaptant mieux les variétés aux conditions de SD**. Cette marge est constituée par la biomasse additionnelle produite chez le riz SD sans être transformée en grains. Sur la base de cette hypothèse, un nouvel idéotype de riz a été conçu qui a mobilisé les sélectionneurs et physiologistes de l'IRRI depuis sa première formulation en 1988 [96].

En principe il s'agit d'un riz qui tolère bien une forte concurrence inter-plante et qui évite une compétition excessive en limitant la croissance de son LAI [14, 56]. Le résultat est une **concentration plus importante d'azote dans les feuilles et des assimilats libérés pour la mise en réserve** (amidon dans les tiges et gaines). Finalement, cet idéotype possède une **capacité de tallage réduite**, des **tiges épaisses** (et donc résistantes à la verse) et de **grandes panicules** (compensant le nombre limité de tiges). Une étude de modélisation a été menée pour tester l'effet théorique d'une **répartition modifiée des assimilats entre les feuilles et les tiges (stockage des réserves) et de l'azote entre les feuilles vieilles et jeunes (concentrer un maximum d'azote dans la strate supérieure du couvert)** [56]. L'impact simulé très important de ces caractéristiques "génétiques" a contribué à la définition de l'idéotype. A ce stade de sa conceptualisation, l'idéotype a été confié aux généticiens et sélectionneurs de l'IRRI pour sa réalisation.

Après mon départ de l'IRRI fin 1990 le nouvel idéotype fut d'abord nommé "Super Rice" (étiquette sous laquelle, après une publicité précoce et sensationnaliste, le concept fut controversé), puis **"New Plant Type" (NPT)**¹⁸.

Bilan de l'étape 1 en rétrospective

Douze ans plus tard je constate que mes travaux ont fortement affecté la stratégie de recherche de l'IRRI. Malheureusement, une publicité inappropriée à un stade précoce des recherches (réalisation de la morphologie mais pas encore du fonctionnement physiologique de l'idéotype) a fait certains dégâts. Aujourd'hui il nous semble que l'utilisation exclusive des sources génétiques de type japonica, déjà proche de la morphologie visée mais peu adapté aux milieux aquatiques-chauds, était un choix risqué¹⁹. Des recherches menées conjointement par le Cirad et l'IRRI (Projet de P Siband 1999-2001) sur le NPT ont précisé les faiblesses physiologiques de certaines lignées (croissance lente [75], faible régulation des puits [rédaction d'une publication en cours]). Cependant, les efforts des généticiens progressent et

¹⁸ Peng S, Khush GS, Cassmann, KG. 1994. Evolution of the new plant type for increasing yield potential. In : Cassmann KG (Ed). Breaking the Yield Barrier. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, 5-20.

¹⁹ Bentota AP, Senadhira D, Lawrence MJ. 1998. Quantitative genetics of rice. III. The potential of a pair of new plant type crosses. Field Crops Res. 55, 267-273.

les résultats récents semblent encourageants. Il paraît d'ailleurs que des efforts indépendants en Inde de réaliser le NPT donnent des résultats intéressants²⁰

Une leçon générale est évidente: la conception d'un nouvel idéotype sur la base d'un raisonnement physiologique et agronomique doit impérativement être accompagnée par l'étude du comportement des matériels génétiques candidats (sources génétiques des caractères recherchés), et par une caractérisation génétique des caractères recherchés.

²⁰ Arvind-Kumar, Tiwari RKS, Parihar SS, Pandya KS, Janoria MP, Kumar A. 1998. Performance of new plant-type rice breeding lines. Agric. Sci. Digest Karnal. 18, 198-202.

Etape 2 : Riz irrigué au Sahel -- Variétés adaptées et modèles d'aide à la décision pour mieux maîtriser les aléas climatiques

Enjeux et objectifs

Un des buts de l'Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest (ADRAO) est de rendre plus rentable et durable la riziculture irriguée au Sahel. Dans ce cadre, une équipe de 2 chercheurs (un sélectionneur et moi-même) se sont engagés en 1990 à développer une station et un programme de recherche à Saint Louis (Sénégal). Le mandat de cette structure est l'appui scientifique (agronomie, sélection...) aux systèmes rizicoles du Sahel, dans la majorité situés au long des fleuves Niger, Sénégal, Chari/Logone et Volta (syn. Mouhoun). Généralement il s'agit des périmètres irrigués, résultat d'investissements publics et internationaux lourds, pour la plupart créés à la suite des grandes sécheresses des années 70. Leurs principaux problèmes sont leur faible rentabilité (à l'échelle de la parcelle et du périmètre, en partie due à la non-adoption de la double culture de riz prévue par les constructeurs des périmètres) et une variabilité inexploitable des rendements, et la salinisation progressive de certains périmètres.

En effet, un premier diagnostic régional (études bibliographique et tour des périmètres irrigués principaux de la sous-région par une petite équipe d'experts avec ma participation en 1991) a identifié trois contraintes prioritaires : le stress thermique en phase reproductive, la salinisation des périmètres²¹ et l'enherbement sous condition de semis direct (pratiqué au Sénégal et en Mauritanie).

Les travaux ont pour objectif d'identifier les principales contraintes responsables de l'instabilité des rendements du riz irrigué au Sahel, particulièrement en condition de double culture, et de concevoir des stratégies (génétiques et/ou agronomiques) pour leur maîtrise. Les résultats décrits présentement portent sur le stress thermique.

Démarche

Au cœur de ces travaux se trouvent des essais « date de semis » (dispositif de semis mensuel appelé « Rice Garden »), menés pour plusieurs variétés de riz sur un site représentant le climat côtier (Ndiaye dans le delta du fleuve Sénégal) et un autre rayant un climat plutôt sahélien-continental (Fanaye près de Podor, Sénégal). Après confirmation des causes climatiques d'une grande partie de la variabilité des rendements, des études approfondies ont également menées sur le microclimat (ex : la température de l'eau en fonction du LAI) et son impact sur la phénologie et les composantes du rendement (fertilité des épillets et remplissage des grains). Les résultats ont permis de développer un modèle (RIDEV) du microclimat, de la phénologie du riz et de son taux de stérilité, grâce auquel la variabilité temporelle (inter et intra annuelle) et spatiale (échelle régionale) des risques de stress climatiques ont pu être simulés. Le même modèle a été utilisé pour l'optimisation des calendriers rizicoles en fonction de la variété, du site et du système de culture (simple ou double), et également pour l'évaluation des nouvelles variétés de riz. Le couplage de RIDEV avec un modèle de croissance (ORYZA) a également permis de simuler les rendements potentiels en fonction des dates de semis et de leur variabilité inter annuelle et spatiale.

²¹ Mes travaux sur la salinité ne sont pas présentés ici. On les trouve toutefois dans la liste de publications sous [1], [2], [3], [4], [64] et [65].

Principaux résultats

Une cause majeure de la variabilité des rendements : La stérilité des épillets

Dans les champs de production et également dans nos expérimentations nous avons pu mettre en évidence une forte variabilité des rendements, la baisse étant associée à un taux de stérilité élevé, souvent 100%, des épillets. Une forte stérilité était généralement associée soit à une date de semis tardive (en saison principale, juillet à octobre), à l'utilisation d'une variété au cycle relativement long, ou à l'arrivée précoce des coups de froid à la fin de la saison. Un fond de stérilité important mais jamais extrême (20-40%) a également été observé quand la floraison tombait dans des périodes très chaudes. Les essais tri-factoriels **date de semis x variété x site** montrent effectivement que la stérilité des épillets est très sensible aux baisses des températures nocturnes pendant la période de montaison (1-2 semaines avant l'anthèse : méiose dans les organes males) et aux hausses des températures maximales du jour pendant la période d'anthèse [19].

Nos résultats sur les températures et phases critiques pour la stérilité confirment les sources bibliographiques²² : pour le stress hypothermique, les températures minimales journalières inférieures à 18 °C, observées pendant la phase méiotique, provoquent une stérilité supérieure à 50% (seuil CT50 observé au champ par régression linéaire). Par contre, des températures maximales supérieures à 35 °C, qui affectent également la fertilité des épillets, ont leur plus grand effet en période d'anthèse. Observation nouvelle à l'époque : **pour prédire correctement le taux de stérilité il faut connaître la position de l'apex de la plante, qui peut être submergé (phase méiotique : début de montaison) ou se trouver près du sommet du couvert (anthèse)**. La température de l'eau, elle, est fonction des variables agrométéorologiques mais aussi du LAI (effet de l'ombrage).

La stérilité des épillets, peu connue en tant que phénomène de stress chez les riziculteurs du Sahel et parfois attribuée à une maladie ou de « mauvaises semences », est un problème très répandu difficile à prédire à cause de plusieurs problèmes : 1) les calendriers de culture variables, avec des dates de semis souvent tardives à cause de conflits avec d'autres objectifs du producteur (semis des cultures pluviales...), 2) le cycle différent des diverses variétés cultivées localement, 3) la variabilité de ce cycle sous l'effet du photopériodisme, et 4) la variabilité inter et intra annuelles des températures qui joue sur la durée des phases phénologiques et sur l'élaboration du rendement [62]

Modélisation de la phénologie et des phases sensibles aux stress thermiques

Un modèle simple (RIDEV [19, 67]) a été développé et validé dans la région sur la base des observations au champ. Ce modèle simule la durée du cycle et les phases sensibles de l'inflorescence sur la base du temps thermique (utilisant la température de l'eau simulée pour toutes les phases phénologiques avant montaison), la photopériode et le stress associé au choc de repiquage. **Le modèle permet de prédire la probabilité des incidences de stérilité à partir des années de climat historique, en fonction du site (variables du climat, photopériode...), de la variété, de la date de semis et de la méthode de plantation (repiquage ou SD).**

²² Nishiyama I. 1984. Climatic influence on pollen formation and fertilization. In : Tsunoda S, Takahashi N (Eds). Biology of Rice. Elsevier, 153-172.

RIDEV, dans une version intégrant aussi la proposition des dates idéales pour certaines interventions agronomiques, a été diffusé à un grand nombre d'utilisateurs dans le Sahel dont des coopératives rizicoles, à des projets de recherche développement, à des services agricoles, à des chercheurs dans la région et à quelques producteurs de riz privés. Il sert également comme outil didactique dans des cursus agronomiques universitaires (ex. : Université de Bonn).

Analyse des risques climatiques et optimisation des calendriers culturels

Une étude sous-régionale a été menée utilisant RIDEV pour caractériser les dates limites de semis en fonction du site et la variété (premières dates possibles en contre-saison et dernières dates en saison principale) [21]. L'étude a également permis de quantifier la marge temporelle de manœuvre à l'échelle de la saison, parfois très limitée, pour la réalisation de la double culture de riz. Cette analyse montre que des gradients thermiques N-S (du désert à la zone des savanes) et O-E (de la côte atlantique à l'intérieur du continent) jouent fortement sur les calendriers réalisables et sur les risques de stérilité, et doivent être pris en compte dans les recommandations nationales ou régionales.

Une autre étude sous-régionale similaire a été menée en simulant la distribution des rendements potentiels dans le Sahel en fonction de la saison et de la variété. L'étude se sert d'un modèle couplé (ORYZA_S, 'S' pour Sahel) composé de RIDEV (pour la phénologie) et ORYZA (pour l'élaboration du rendement et certains composants de sa qualité) [52, 59, 70]. Cette étude confirme le phénomène des gradients N-S et O-E, avec des rendements potentiels plus élevés en zone de savane qu'au Sahel, et plus élevés dans la zone côtière (delta du fleuve Sénégal) qu'en intérieur du continent.

Modèle inversé pour déterminer les constantes photothermiques

Dans sa forme inversée le modèle RIDEV permet de déterminer les constantes photothermique caractérisant la sensibilité du développement phénologique d'un génotype au climat (approche heuristique par optimisation, utilisant la méthode des moindres carrés) [20]. Cette approche a été réalisée sur 49 génotypes déjà cultivés au Sahel ou proposées par les sélectionneurs. L'étude montre que le cycle des variétés adoptées par les riziculteurs au Sahel est relativement insensible aux fluctuations thermiques et photopériodiques, ce qui les qualifie en principe pour la double culture. Une explication possible de ces préférences variétales des agriculteurs, qui pratiquent très peu la double culture du riz, est liée aux cultures pluviales associées aux systèmes irrigués. Les calendriers rizicoles doivent s'accorder à ceux des cultures pluviales, déterminés par une pluviométrie très variable, monopolisant la main d'œuvre pendant les périodes creuses. Par conséquence, des variétés ayant un cycle et des rendements peu sensibles à la date de semis sont très recherchées dans la zone²³. (PY Le Gal, agronome ciradien travaillant dans la même zone, montre également que le partage des

²³ Comme le montrent nombreuses études (ex : Vaksman et al. 1996, Le photopériodisme des sorghos africains. Agriculture et Développement 9, 13-18), les variétés préférées de mil et sorgho se comportent de façon opposée : forte sensibilité à la photopériode et variabilité du cycle, nécessaires pour assurer une floraison avant la fin des pluies et une maturation sous des conditions relativement sèches.

machines agricoles à l'échelle des périmètres ou villages exige une souplesse considérable calendriers rizicoles [62].)

Parmi les nombreuses variétés de riz sélectionnées et proposées aux producteurs, celui-ci n'a retenu que des génotypes caractérisés par...

- une température de base faible,
- une température optimale élevée,
- une phase juvénile relativement longue, et
- une faible sensibilité à la photopériode.

Sur la base des 5 constantes « photothermiques » de RIDEV²⁴ qui décrivent le comportement phénologique d'un génotype, on peut définir des écotypes ou, dans l'optique du sélectionneur, des idéotypes. En effet, des objectifs de sélection ont été définis pour différents systèmes de cultures et zones climatiques [100]. Dans la suite de ces travaux j'ai pu proposer et encadrer un sujet de thèse sur l'héritabilité des constantes photothermiques du riz [40, 41, 42].

Bilan de l'étape 2 en rétrospective

Les travaux réalisés sur le riz irrigué au Sahel, dans l'ensemble plutôt orientés vers l'agronomie, ont profité d'une collaboration étroite avec des généticiens et sélectionneurs. Une fois les contraintes biophysiques et les enjeux scientifiques caractérisés, deux sujets de thèse (Moussa Sié sur les adaptations photothermique [40, 41, 42] et Folkart Asch sur la salinité [1, 2, 3, 4]) ont été initiés pour approfondir le travail. Cette démarche pragmatique, faisant appel aux différentes disciplines et aux ressources humaines de façon ponctuelle et finalisée, était nécessitée par un budget très limité. Mais elle montre aussi comment une combinaison de facteurs favorisant un esprit de d'initiative (une jeune équipe libre d'élaborer ses priorités, la nécessité de chercher ses propres financements, un terrain de recherche valorisant et peu exploité) peut motiver des efforts de recherche très efficaces – ou, admettons-le, provoquer l'échec.

A mon départ du Sénégal fin 1994 j'ai été remplacé par un agronome qui a pu approfondir et valoriser dans le milieu réel les approches développées. L'impact important du programme de sélection variétale à Saint Louis est illustré par la variété Sahel 108, qui a largement remplacé les anciennes variétés de cycle court et moyen dans le delta et la vallée du fleuve Sénégal. Cette variété, sélectionnée en partie à l'aide du modèle RIDEV, est très précoce, assez insensible aux fluctuations thermiques, et donne des rendements sensiblement supérieurs par rapport aux variétés précoces cultivées précédemment.

²⁴Tbase = température de base, Topt = température optimale, Tsum = somme des températures minimale pour atteindre la floraison, BVP = « basic vegetative phase » ou phase juvénile, CPP = « coefficient of photoperiod sensitivity » ; des constantes génotypiques supplémentaires beaucoup moins variables ont été définies pour calculer la durée de la maturation des panicules et leur sensibilité au froid et à la chaleur.

Etape 3 : Riz pluvial en Afrique de l'Ouest -- Vers un nouvel idéotype pour les systèmes fortement enherbés et limités par la main d'œuvre

Enjeux et objectifs

Le riz pluvial est une composante importante des systèmes de culture extensifs dans les zones humides et sub-humides de l'Afrique de l'Ouest. Il est la culture dominante en N-O Côte d'Ivoire, au Libéria, en Sierra Léone et en Guinée. La durabilité écologique et économique de ces systèmes est mise en cause lors d'une intensification rapide, dans la plupart des cas sans ajustement des itinéraires techniques et niveaux d'intrants.

L'ADRAO classe les **adventices comme la première contrainte à la production rizicole en Afrique de l'Ouest**, particulièrement sévère dans les systèmes pluviaux intensifiés (aérobique et bas-fonds) : Selon une étude multidisciplinaire que j'ai pu initier et diriger en 1996 (résultats non publiés), faisant appel aux modèles de cultures, aux statistiques régionales et nationales et aux experts, l'impact économique de l'enherbement dépasse celui des problèmes nutritifs, phyto-sanitaires et de sécheresse (Fig. 1). A noter que cette analyse ne prend pas en compte les interactions entre ces contraintes, comme par exemple le fait que la compétitivité du riz par rapport aux adventices diminue sous contrainte hydrique.

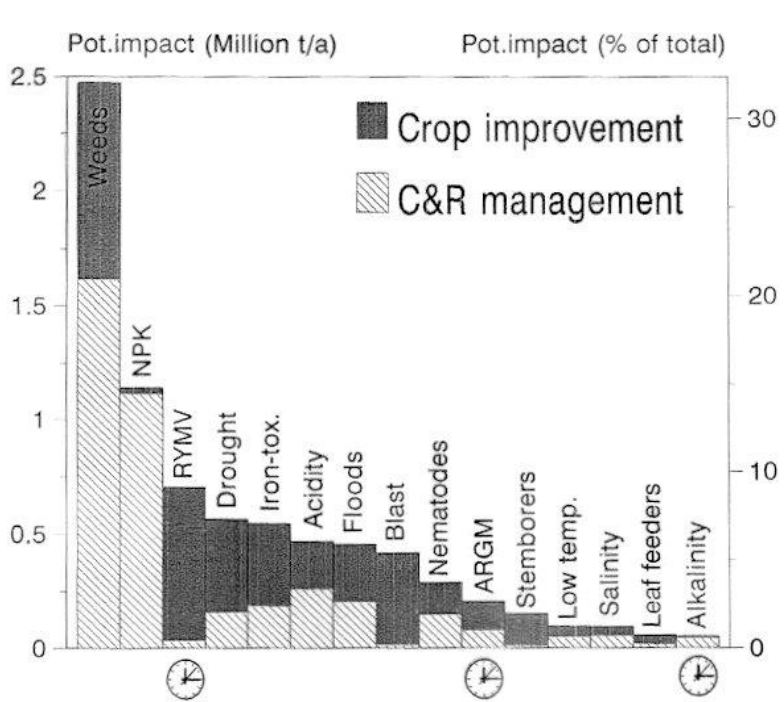


Fig. 1.

Exemple de résultats d'une étude semi-quantitative « ex-ante », menée à l'ADRAO pour l'ensemble des écosystèmes rizicoles en Afrique de l'Ouest en 1996, portant sur l'impact potentiel de ses recherches en terme de gains de production régionale. On distingue entre les interventions issues de l'amélioration variétale et de la recherche agronomique (« crop and ressource management »), s'adressant à une gamme de contraintes biophysiques qui affectent la riziculture dans la région. La lutte contre les adventices (faisant appel aux variétés plus compétitives et aux mesures agronomiques), la gestion des éléments nutritives (« NPK ») et la résistance génétique à une virose (panachure jaune ou « Rice Yellow Mottle Virus ») sortent en premières places. Les horloges marquent des problèmes à ampleur progressive, nécessitant une intervention urgente.

Vu le coût important (ou l'indisponibilité) de la main d'œuvre et des herbicides, toute solution au problème de l'enherbement doit être réalisable avec des moyens très limités. **Nous nous sommes donc focalisés sur la compétitivité des génotypes (économie : le producteur produit ses propres semences une fois la variété obtenue), complétée par des mesures agronomiques (plantes de couverture semées en relais dans le riz** [travaux non présenté dans ce mémoire²⁵]). L'approche génétique envisage de combiner la bonne compétitivité du riz africain (*O. glaberrima*) avec les meilleurs rendements des riz asiatiques introduits (*O. sativa* de type japonica).

Démarche

La démarche fait appel à un ensemble de disciplines (agronomie, malherbologie, génétique et sélection, écophysiologie, sciences économiques...) et de sous projets réunis dans le programme de recherche que j'ai pu diriger à l'ADRAO. Au cœur de ces recherches se trouvent des croisements interspécifiques (*O. glaberrima* x *O. sativa*) à l'aide des outils biotechnologiques (culture d'anthères, création de lignées haploïdes doublées, 'embryo rescue'...). Sur station, la caractérisation détaillée du comportement phénologique, morpho-physiologique et agronomique des parents et lignées interspécifiques, y compris une confrontation aux différents écosystèmes (aquatique, pluvial plus ou moins sec, type et niveau de fertilité des sols...). Dans le milieu réel, la réalisation d'une approche participative de sélection variétale (non présentée dans ce mémoire) qui s'ajoute au programme indispensable d'évaluation multi-local.

Les recherches écophysiologiques élaborent les composantes d'un nouvel idéotype en s'appuyant sur l'évaluation d'un grand nombre de génotypes au champ sous compétition réelle : identification des caractères architecturaux, morphologiques et physiologiques contribuant à la compétitivité et aux rendements obtenus sous compétition. Elaboration d'un modèle à base d'ORYZA et de nouveaux outils de sélection. Initiation d'un programme modeste de génétique moléculaire pour appuyer la réalisation de l'idéotype.

²⁵ Parallèlement aux recherches génétiques et de sélection, une équipe d'agronomes et malherbologues de l'ADRAO a développée des itinéraires techniques à base de cultures de relais, utilisant des légumineuses pour maintenir la fertilité du sol et contrôler la prolifération des adventices.

Exemple : Kent R, Johnson DE, Becker M. 2001 The influences of cropping system on weed communities of rice in Cote d'Ivoire, West Africa. Agric. Ecosyst. Envir. 87, 299-307.

Principaux résultats

Classification des écotypes de riz sur la base de leur phénologie

Une étude de phénologie comparée (durée du cycle et de ses phases constituantes, sensibilité à la photopériode...) sur une toposéquence (continuum pluvial-hydromorphe-aquatique) nous permet de caractériser l'adaptation d'un échantillon de 84 variétés et lignées de riz [27]. Dans cet échantillon sont inclus des exemples de tous les **grands groupes génétiques de riz cultivé** en Afrique (*O. glaberrima*, *O. sativa* de type **indica** (grp 1 selon la classification isozymatique développée par JC Glaszmann) et **japonica** (grp 6)), ainsi que des **écotypes** différents (adaptation aux régimes hydrologiques et photopériodiques). L'échantillon comprenait également des **variétés traditionnelles** (adaptées à la culture extensive) et **améliorées**, issues des programmes de sélection (adaptées aux systèmes intensifiés).

Selon les résultats les variétés améliorées généralement considérées insensibles à la photopériode sont en réalité légèrement à moyennement sensibles. Par contre, la plupart des *O. glaberrima*, généralement de type traditionnel, sont beaucoup moins sensibles à la photopériode que supposé auparavant. Une classification des génotypes par ACP montre que les races d' *O. glaberrima* **possèdent une phase juvénile (phase insensible à la photopériode) beaucoup plus courte que les races d' *O. sativa japonica* (variétés traditionnelles)**. Nous expliquons ce phénomène par le fait que la faible vigueur au départ chez les *O. sativa* a obligé les riziculteurs-sélectionneurs à favoriser une durée plus longue de la croissance végétative. **Par contre, les variétés "modernes" d' *O. sativa* 'japonica' sélectionnées par des scientifiques approchent le comportement phénologique d' *O. glaberrima***. Ce choix convient aux producteurs de riz pluvial qui cherchent généralement des variétés précoces, mais elle nécessite une très bonne maîtrise des mauvaises herbes.

L'étude conforte notre choix d'utiliser des source génétiques *sativa* 'japonica' et *glaberrima* pour la création des variétés à la fois précoces, compétitives et productives.

*Caractérisation d'un croisement *O. sativa* x *O. glaberrima**

La création des lignées stables et fertiles, issues des croisements *O. sativa* x *O. glaberrima* à l'ADRAO dans les années 90, constitue une ouverture importante pour l'amélioration génétique du riz [35]. La caractérisation morpho-physiologique de WAB56-104 (*O. sativa*) et CG14 (*O. glaberrima*) et certains de leurs descendants montre une forte complémentarité entre les adaptations observées chez les parents : l'évolution très rapide du LAI et la capacité de couvrir le sol chez CG14, les rendements potentiels appréciables sur un fond de bonne adaptation au milieu biophysique chez WAB56-104. A l'origine de ce comportement contrasté sont en partie les mêmes paramètres morphologiques, notamment la **surface spécifique des feuilles** ('specific leaf area', SLA : important chez CG14, faible chez WAB56-104) et la **capacité de tallage** (également) [24]. Le SLA élevé de CG14 par rapport à WAB56-104 (donc des feuilles moins épaisses) lui permet de développer un LAI deux à trois fois supérieur, au prix d'un taux de photosynthèse inférieur à l'échelle de la feuille.

Un SLA élevé est généralement associé à un coût physiologique faible de production des feuilles. Il permet donc un taux de croissance plus important en phase précoce quand ε_a (la

fraction du rayonnement intercepté) limite encore l'assimilation du carbone (couvert \pm ouvert). Par contre, un SLA élevé ne permet plus une croissance optimale une fois que le ε_a approche sa valeur maximale de 1 : sur fond d'un ε_a constant, le coefficient de conversion du rayonnement intercepté ε_b devient limitant, celui-ci étant supérieur pour des feuilles épaisses (SLA inférieur).

Si le SLA idéal était différent pour les différents stades de développement des plantes (ou états de leur couvert), le même constat peut être fait pour le port du couvert, qui affecte le coefficient d'extinction du couvert (K_{df}) à travers son angle moyen des feuilles. Un peuplement en cours de colonisation de l'espace disponible ($\varepsilon_a \ll 1$) est mieux servi par des feuilles plutôt horizontales ou tombantes, et un couvert fermé (ε_a situé entre 0,9 et 1) atteindra une assimilation maximale avec des feuilles dressées. En effet, un SLA faible est souvent associé à un port dressé des feuilles (résultat d'une meilleure rigidité mécanique ?) mais il existe des variétés indica possédant des feuilles très dressées mais minces (SLA élevé) [25]. Les *O. glaberrima*, par contre, réalisent généralement une stratégie maximisant ε_a (SLA élevé, feuilles tombantes), permettant une colonisation rapide comme le font les adventices, et les *O. sativa japonica* améliorés réalisent souvent une stratégie inverse (maximiser ε_b). Pour le sélectionneur qui vise à créer une plante à la fois compétitive et productive, **il est donc souhaitable de réaliser une morphologie de type "glaberrima" (exemple : CG14) en phase précoce pour mieux concurrencer les mauvaises herbes, suivie par une morphologie plutôt comme celle de la WAB56-104 en phase de reproduction. Certains descendants du croisement étudié montrent cette tendance [24].**

Déterminants morpho-physiologiques de la compétitivité du riz

Un spectre large de génotypes de riz (*O. sativa* indica et japonica, *O. glaberrima*, descendants stables des croisements inter-spécifiques) a été simultanément soumis à deux types d'essais au champ, 1) une caractérisation morpho-physiologique en mono-culture et 2) une mise en concurrence avec des adventices vraies (flore annuelle du site, surtout des astéracées) et simulé (maïs, niébé...). L'essai No. 2 permet de calculer un **indice de compétitivité** pour chaque génotype (G_i) par rapport à un génotype de référence (R_i) en calculant le rapport entre son rendement sous compétition avec R_i (compétition $G_i:R_i$) et le rendement sous mono-culture (compétition $G_i:G_i$). L'indice, qui peut varier en fonction du type morphologique et phénologique de R_i , a ensuite été comparé avec les résultats de l'essai No. 1 (mono-culture) pour identifier des caractères contribuant à la compétitivité [25].

Le résultat principal est que l'indice de compétitivité est très fortement corrélé avec le SLA, la capacité de tallage et la durée du cycle (ou la durée de BVP). Les corrélations de l'indice de compétition avec l'indice d'extinction (K_{df}), l'angle d'inclinaison moyenne des feuilles, le coefficient de répartition des assimilats entre feuilles et tiges, et la hauteur de la plante sont réelles mais moins marquées. Généralement, le SLA des variétés mesuré à l'échelle du couvert, paramètre très robuste au travers les milieux, prédit à la fois la surface foliaire et la capacité de tallage pour un niveau donné de ressources disponibles [25, 32, 75]. L'étude confirme la compétitivité supérieure des variétés d' *O. glaberrima* et précise quelques déterminants morpho-physiologiques et architecturaux de cette compétitivité.

Définition d'un idéotype à la fois compétitif et productif

Un objectif de rendement potentiel important nécessite d'abord un ε_a proche de 1,0 (recouvrement complet du sol), ensuite un coefficient très élevé de conversion de l'énergie absorbée (ε_b). Un ε_b élevé nécessite des feuilles dressées (K_{df} faible), épaisses (SLA faible), poreuses (stomates ouvertes) et riches en azote (teneur élevée en chlorophylle et carboxylase par unité de surface des feuilles). A l'exception de la porosité, ce sont précisément les caractéristiques morpho-physiologiques qui défavorisent l'installation rapide d'un couvert, et donc, une bonne compétitivité de la partie aérienne de la plante. (En présence de stress hydrique et nutritif, cette hypothèse n'est plus valable parce que l'objet de la compétition n'est plus la lumière ; les relations de compétitions se déplacent donc de la partie aérienne vers les organes souterrains.)

Ce constat suggère en principe que les objectifs d'une production et d'une compétitivité maximales sont incompatibles car ils nécessitent des adaptations contraires, illustrées parfaitement par CG14 (un *O. glaberrima* très compétitif) et WAB56-104 (le pire compétiteur parmi les variétés confirmées de l'ADRAO mais un bon producteur) [24]. Nos analyses montrent, par contre, que ces deux comportements sont théoriquement compatibles dans un génotype unique qui change son comportement au cours de son développement. L'idéotype proposé combine donc les deux architectures par décalage : un **comportement colonisateur** (comme CG14) en phase précoce pendant laquelle la « course » avec les adventices se déroule et se décide, et un **comportement assimilateur** (comme WAB56-104) pendant les phases critiques d'élaboration du rendement.

Ce **concept d'une « métamorphose » de la plante au cours de sa morphogenèse**, peu habituel pour le sélectionneur, n'est pas forcément incompatible avec la biologie de la plante. Au contraire, toutes les graminées expriment un peu ce comportement au cours de leur développement (chute du SLA, augmentation de la rigidité des limbes), caractéristique qu'il s'agit donc de renforcer avec les outils de création et sélection variétale. Grâce à leur comportement contrasté, les variétés du type *O. glaberrima* et *O. sativa* sont des sources génétiques idéales pour la réalisation de ce concept, malgré leur barrière de stérilité difficile à surmonter.

Le nouvel idéotype, pour la première fois décrit dans une publication scientifique en 1997 [35], a été baptisé d'abord « low-management plant type » (faisant allusion aux économies de main d'œuvre associées à sa compétitivité, puis « Bintou rice » d'après le nom d'une jeune et jolie rizicultrice inventée pour des raisons de publicité, et aujourd'hui « **Nerica** » (synthèse de « New », « Rice » et « Africa »)²⁶.

Vers la réalisation de l'idéotype « Nerica »

Parallèlement aux études écophysiologiques, les croisements et activités de sélection se poursuivaient. Certains génotypes comme la "V4" citée dans plusieurs articles [24, 25, 26, 35] (WAB-450-24-3-2-P18-HB) sont devenus une référence importante pour la recherche, et

²⁶ Guei RG, Adam A, Traore K. 2002. Comparative studies of seed dormancy characteristics of two *Oryza* species and their progenies. Seed Sci. Technol. 30, 499-505.

d'autres ont déjà été vulgarisés dans plusieurs pays de l'Afrique de l'Ouest. Mais ces variétés ne correspondent qu'en partie à l'idéotype et à nos attentes par rapport à leur compétitivité. Tous les éléments nécessaires pour l'exploitation de ces nouveaux concepts ne sont pas encore réunis :

- La **diversité des matériels parentaux** reste toujours trop limitée à cause de la barrière de stérilité. On n'accède donc qu'à une petite fraction de la diversité génétique existante.
- Le répertoire d' **outils de sélection** mis en œuvre est également incomplet. Par exemple, il manque des marqueurs phénotypiques ou génétiques (QTL) pour l'expression des caractères architecturaux pendant des phases phénologiques spécifiques.

(Sur la base des études écophysiological, certains outils de sélection ont été développés et proposés, par exemple une sélection pour un SLA élevé en stade très précoce (2 semaines après germination) [5]. Cet outil peut être combiné avec une sélection pour des plantes aux feuilles riches en chlorophylle au stade de floraison (chlorophyll meter « SPAD », Minolta, Japon), permettant de sélectionner à la fois des plantes ayant des feuilles épaisses (SLA faible) et une bonne forte teneur en azote.)

- Le **génome** de *O. glaberrima* est insuffisamment caractérisé pour permettre la conception d'une approche moléculaire efficace.

Pendant les dernières années de ma présence à l'ADRAO j'ai pu initier, avec mon successeur le sélectionneur Monty Jones, un programme modeste de recherche moléculaire et biotechnologique, ainsi qu'un projet de sélection participative spécialement conçu pour les hybrides inter-spécifiques. Mais un effort plus global et transversal est nécessaire pour atteindre la masse critique scientifique pour la réussite de ce projet ambitieux.

Bilan de l'étape 3 en rétrospective

Le grand intérêt à la fois scientifique et stratégique (dans un cadre de développement) de ce projet s'explique par les liens évidents entre les **Nerica** et plusieurs grands thèmes de notre époque : la **lutte biologique** (contre les adventices, passant par une meilleure compétitivité de la culture), la **biodiversité** (mobilisation et conservation du germplasma marginalisé et rare), une contribution à la **stabilisation des agro-écosystèmes en voie de dégradation**, un projet faisant appel aux **biotechnologies modernes** (par défaut controversées) pour un but noble. Si l'impact réel de ces recherches reste pour l'instant très localisé (ex : adoption rapide des Nerica en Guinée), c'est surtout un résultat de leur faible ampleur (par rapport aux ambitions et potentialités théoriques) et leur isolement (par rapport aux grands laboratoires génétiques et rizicoles).

Sur le plan écophysiological deux objectifs restent inachevés, (1) l'intégration de la **résistance à la sécheresse** dans le fonctionnement de l'idéotype et (2) des concepts pour un **passage ultérieur du milieu pluvial stricte (aérobique) aux milieux aquatiques**. Concernant la résistance à la sécheresse, est-elle compatible avec l'objectif d'une forte vigueur au départ (qui consomme beaucoup d'eau) ? J'ai pu mener certaines études sur les aspects hydriques [26] mais une analyse intégrative, utilisant une version spécialisée du modèle ORYZA, n'a plus été réalisée à cause de mon départ de l'ADRAO en 1998.

Concernant les milieux aquatiques, un grand nombre de résultats non publiés montrent que les Nerica héritent généralement de leur parent *O. sativa* (type japonica) une forte sensibilité à l'anaérobiose. Il s'agit donc d'étudier les causes de la non expression des adaptations d' *O. glaberrima* dans ces matériels, ou de faire appel aux sources génétiques alternatives (indica au lieu de japonica sur la coté *O. sativa*). Cette dernière piste est en cours d'exploration par l'IRD et l'équipe de l'ADRAO à Saint Louis. **En cas de réussite, les Nerica seront ultérieurement d'un grand intérêt pour les systèmes rizicoles aquatiques fortement enherbés, soit à cause d'une pression inhérente au milieu (semis à la volée, maîtrise incomplète de l'eau), soit à cause d'un choix agronomique (pour la filière biologique).**

C – Discussion générale et synthèse

Faire de la science dans l'attente d'un impact économique : connaître la demande et les options

Les trois étapes de recherche décrites sont consacrées à trois écosystèmes et situations socio-économiques très différentes. **La finalité commune de ces recherches est d'adapter les technologies de production rizicole (variétés, ITK...) à une évolution rapide des paramètres économiques et écologiques de la production.** Ces transitions agricoles obligent les acteurs de la filière, dont les producteurs, à changer leur comportement (passage du repiquage à SD en sud-est Asie ; choix raisonné de calendriers de cultures et de variétés au Sahel face au désengagement de l'état ; nouvelle gestion de la flore adventice, de la culture et du sol pour les systèmes à base du riz pluvial à jachère courte ou absente). Ces mutations du système nécessitent donc des technologies susceptibles d'établir et de stabiliser son nouveau fonctionnement.

En supposant que la recherche agricole obtient son plus grand impact là où les systèmes sont déstabilisés et prêt à changer, nos trois thématiques ont probablement été bien choisies. Cette optique positive se présente cependant plutôt en rétrospective -- y avait-il moyen de positionner le problème, et d'identifier les demandes et options technologiques, plus concrètement a priori ?

Chez les CIRA les études sur l'impact *ex-ante* (potentiel) et *ex-post* (réalisé) sont devenues quasiment obligatoires au cours des années 90. L'utilité de l'étude *ex-post*, rarement menée pour les recherches appliquées, est certaine : connaître le niveau de l'adoption et de la performance d'une technologie déjà vulgarisée permet d'éviter la répétition des erreurs. Les études *ex-post* sont généralement basées sur des enquêtes structurées, suivies par une extrapolation statistique et parfois par une modélisation explicative à l'échelle micro-économique.

L'étude *ex-ante*, qui est une prévision, utilise des modèles économiques et biophysiques, des bases statistiques et également les opinions d'experts. La démarche doit être très structurée et transparente parce que le résultat dépendra de nombreux choix (quelles déterminants du système retenir dans la synthèse des scénarios ?). J'ai mené avec mon équipe pluridisciplinaire à l'ADRAO une telle étude (Fig. 1) -- exercice didactique et parfois douloureux pour le spécialiste (phyto-pathologiste, chimiste du sol...) qui risque de voir presque disparaître l'impact de "son" stress, très visible dans les parcelles de démonstration, à l'échelle de la région. Notons aussi que, face aux données statistiques incomplètes (ou pire...) pour les régions chaudes (productions, superficies, distribution des variables du climat et du sol...) l'étude *ex-ante* risque de confirmer ce que le chercheur croit déjà savoir.

La justesse des prévisions *ex-ante* souffre également d'un manque de prise en compte de la dynamique des systèmes. Autrement dit, on suppose que les systèmes (qui comprennent l'homme) se comporteront demain comme ils se comportent aujourd'hui. **On peut prendre à nouveau l'exemple des trois transitions agricoles évoquées dans ce mémoire qui montrent qu'il existe une co-évolution entre l'environnement socio-économique, les ITK et les cultures (ou les idéotypes, dans le sens d'une variété-type préférée).** Ce constat *per se* n'est pas nouveau, mais il mérite d'être souligné parce qu'il n'existe à mon avis pas de méthodologies pour le prendre en compte dans les analyses *ex-ante*. Dans ce contexte, **il**

serait intéressant d'évoquer le fait que les transitions agricoles se reproduisent (fonction générique de la démographie, de l'évolution des économies, du climat...) – évidemment jamais de façon identique et jamais au même endroit, mais souvent de façon comparable. La mondialisation de la recherche agricole, réalité incontestable et hautement positive, permet de profiter de cette réalité en menant des études comparatives en réseau, et en identifiant des indicateurs de l'évolution probable des systèmes.

Dans le cadre du **riz aquatique**, on constate que la méthode de l'installation de la culture est historiquement passée du **semis direct** (systèmes extensifs sans maîtrise de l'eau, zones inondables) au **repiquage** (intensification I : productivité du terrain) ensuite au **semis direct** "moderne" (intensification II : productivité de la main d'œuvre) (Fig. 2). En Afrique de l'Ouest j'ai pu observer la coexistence de tous ces stades d'évolution des systèmes.

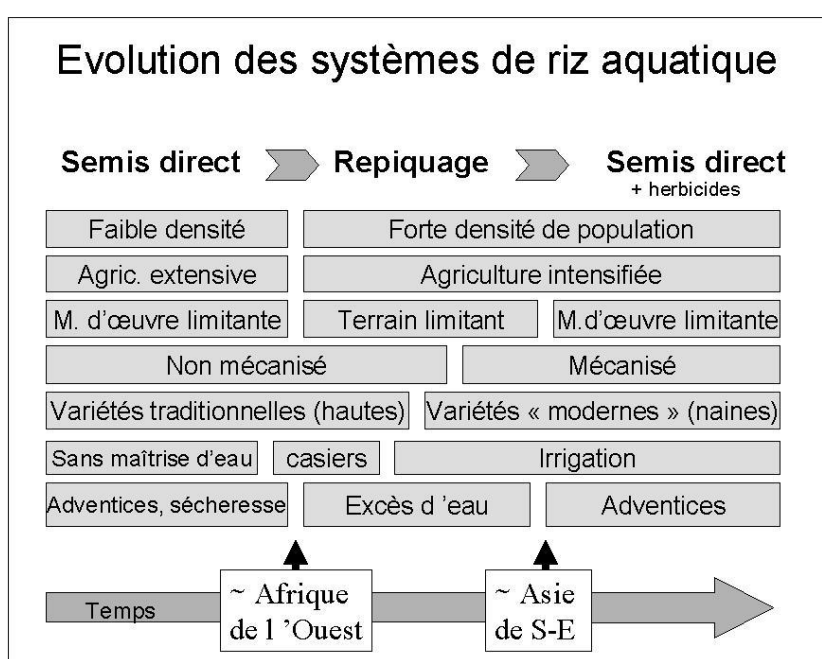


Fig. 2.

Schéma de l'évolution des pratiques culturales à base du riz aquatique. Le terme semis direct signifie le semis du riz sans passage par une pépinière intermédiaire. Le positionnement des systèmes en Afrique de l'Ouest et en Asie de Sud-Est représente une simplification : les deux régions sont très hétérogènes, mais dans l'ensemble caractérisées par une densité très différente de la population humaine.

La classification des systèmes rizicoles, raisonnée sur la base d'une évolution des systèmes de production et de cultures, a été explicitée avec l'appui des économistes de l'ADRAO [72]. Dans le schéma hypothétique de la Fig. 3, l'axe horizontal (évolution démographique, axe de temps) a été complété par un axe vertical représentant le continuum hydrologique entre le pluvial strict et l'irrigué. Ce schéma, associé aux résultats de l'étude *ex-ante* (Fig. 1), nous a servi à définir les priorités et objectifs des recherches agronomiques et génétiques, particulièrement par rapport aux idéotypes et aux contraintes biophysiques auxquelles ils s'adaptent.

L'évolution des idéotypes de riz : positionnement des travaux

A chacune des étapes de l'évolution des systèmes rizicoles (Fig. 3) on peut associer certaines variété-types qui expriment des pressions de sélection exercées soit par l'environnement, par le cultivateur-sélectionneur ou par le sélectionneur scientifique. Dans les plaines inondables et bas-fonds sans maîtrise d'eau, probablement l'écosystème originaire des deux espèces de riz cultivées, le riz est semé à sec avant les inondations et récolté vers la fin des inondations (cas d'immersion profonde) ou après la crue. L'idéotype pour ce milieu est très sensible à la photopériode et possède une morphologie hautement plastique – une céréale proche de ses ancêtres sauvages. La sélection scientifique ne s'est jamais intéressée à cet idéotype mais il en existe toujours, et indépendamment, chez *O. sativa* et *O. glaberrima*. Mes études sur le riz africain et ceux de mes collègues sélectionneurs ont suscité un nouvel intérêt pour cette ressource génétique qui combine des adaptations multiples : à la sécheresse, à l'inondation, à l'enherbement, à la toxicité ferreuse... [35].

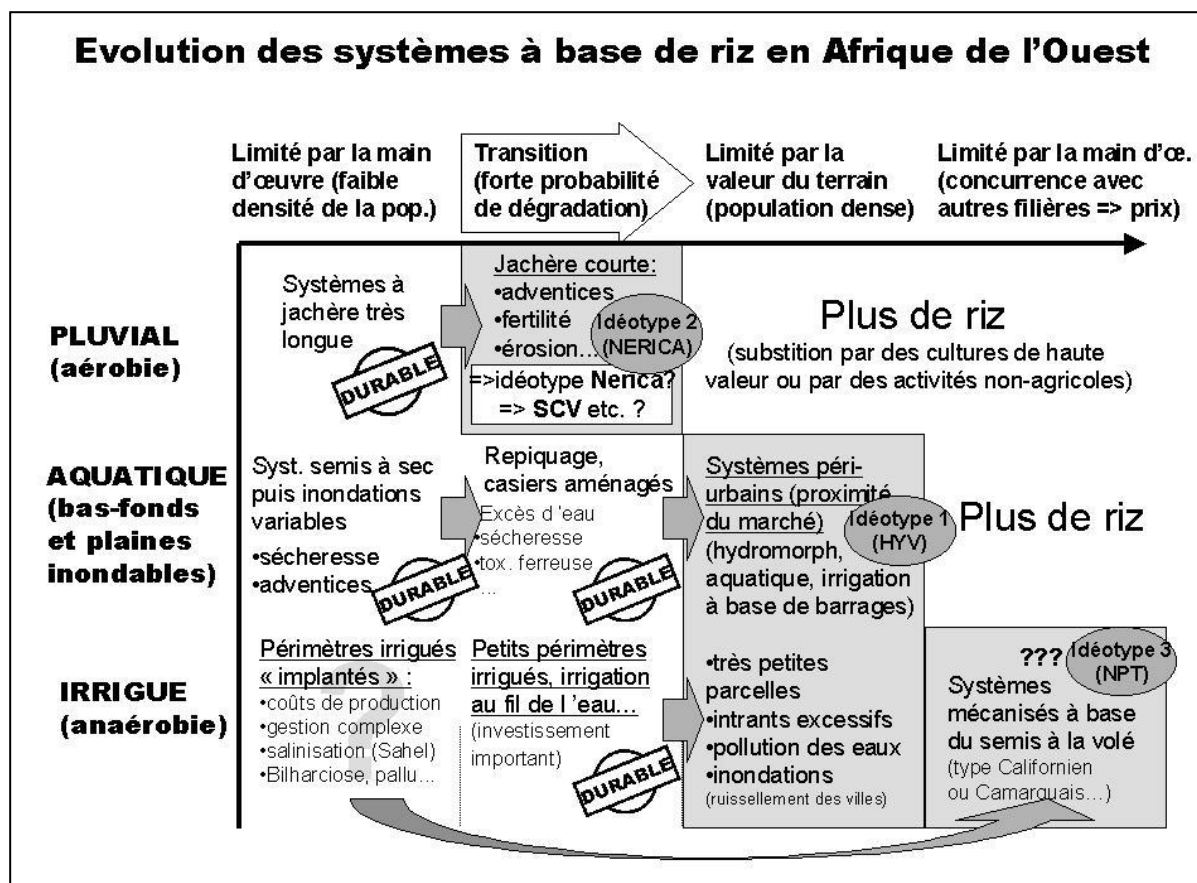


Fig. 3.

Schéma de l'évolution des systèmes rizicoles en Afrique de l'Ouest en fonction des paramètres principaux socio-économiques (axe horizontal : valeur de la main d'œuvre et du terrain, dérivé du schéma Fig. 2) et de l'écosystème hydrologique (axe vertical). La place de trois idéotypes « modernes » de riz est marquée. Ce schéma conceptuel a été utilisé à l'ADRAO pour mieux prioriser et cibler ses investissements dans la recherche.

A l'étape suivante, le passage au repiquage et à une meilleure maîtrise de l'eau ne nécessite plus une forte compétitivité de la plante et permet une morphologie ciblée vers des rendements potentiels supérieurs. Un fort tallage reste essentiel comme compensation au choc du repiquage [13] et une densité du peuplement relativement faible, limitée par la main d'œuvre nécessitée par le repiquage. Le photopériodisme n'est plus nécessaire. **A la fin de cette évolution se trouve l'idéotype de la révolution verte** (ex : IR8). Mes travaux au Sahel ont eu comme cible une variante de cet idéotype qui s'adapte à la double culture (et qui possède donc un cycle court et très constant) dans un climat limite pour ce genre de système (semi-aride, fortes amplitudes thermiques diurnes, saison froide marquée). Vu en rétrospective, l'utilité de cette variété-type n'est pas de permettre la double culture (qui ne s'est jamais généralisée au Sahel) mais de **réaliser une plus grande flexibilité dans la conduite de ces systèmes techniquement exigeants et coûteux (seuil de rentabilité à 3-4 t/ha !)**.

Le troisième grand idéotype, qui n'existe à l'heure actuelle que dans la zone tempérée (le NPT de l'IRRI, basé en grande partie sur mes travaux, n'est pas encore vulgarisé !), est également insensible à la photopériode, mais il possède une capacité de tallage plus faible, une architecture très dressée et des tiges très rigides pour éviter toute verse même sous les conditions de forte fertilisation. Il s'agit donc essentiellement d'adaptations aux peuplements denses. Les difficultés de réaliser un tel idéotype pour le milieu tropical sont apparemment surtout de nature génétique : la morphologie recherchée existe déjà en partie chez l'écotype pluvial de la sous-espèce japonica, qui s'adapte mal à l'anaérobiose (hautes températures x inondation du sol).

Pour les milieux pluviaux – aérobies, les variété-types d' *O. sativa* et d' *O. glaberrima* sont très contrastées (exemples des variétés étudiées dans [24, 25]) :

Tableau 1.

Comparaison morpho-physiologique entre une variété typique d' *Oryza sativa* L. japonica (type tropical variété pluviale) et une variété *O. glaberrima*.

Paramètre	WAB56-104 (<i>O. sativa japonica</i>)	CG14 (<i>O. glaberrima</i>)
Tallage	Très faible	Très fort
Surface spécifique foliaire (SLA)	Faible (=feuilles épaisses)	Elevée
Longueur spécifique des racines ²⁷ *)	Faible (=racines épaisses)	Elevée
Teneur des feuilles en chlorophylle et N	Elevée (vert foncé)	Faible (±translucide)
Phase juvénile (BVP)	Longue	Court
Phyllochron	Long	Court
Compétitivité et vigueur au départ (résultat des paramètres précédents)	Très faible	Très fort

²⁷ A. Audebert, CIRAD/ADRAO 1999, non publié

Ces caractéristiques correspondent parfaitement à la classification écologique des plantes (Fig. 4) selon leur adaptation aux milieux "souvent stressés" (WAB56-104) et "souvent perturbés" (CG14) par H. Poorter et E. Garnier (1999)²⁸. L'adaptation aux perturbations (exemple : feux de brousse) nécessite un comportement plutôt agressif (colonisateur) et l'adaptation aux stress un comportement conservateur (autoprotection). Dans cette logique on peut supposer que l'idéotype de riz pluvial de type *O. sativa* a été plutôt sélectionné dans des milieux secs et leur homologues de type *O. glaberrima* dans des milieux plus humides ou inondables, mais soumis à une concurrence forte avec ses voisins ! (Il sera cependant très difficile de vérifier cette conclusion.)

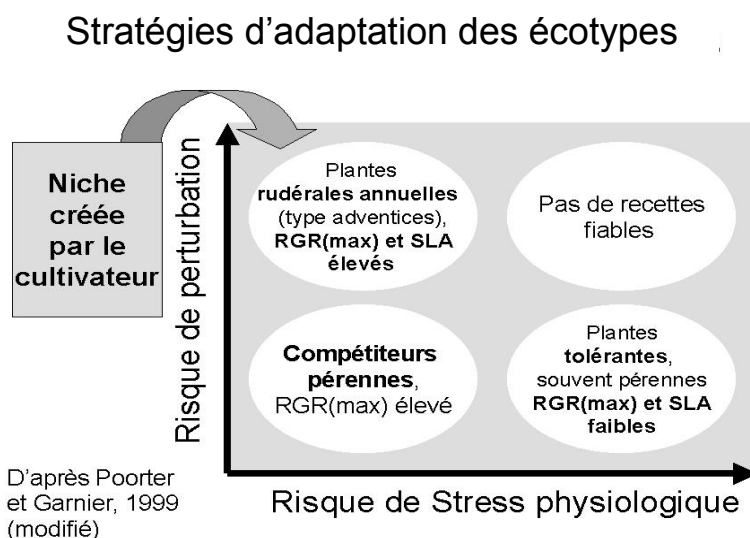


Fig. 4.

Schéma conceptuel classant les plantes selon leurs adaptations aux stress physiologiques (sécheresse, salinité...) et aux perturbations fréquentes du milieu (feux de brousse et autres calamités écologiques) d'après Poorter et Garnier (1999). Les écotypes se distinguent par une plus ou moins importante croissance relative maximale (RGR_{max}) qui dépend de leur morphologie, par exemple leur surface spécifique des feuilles (SLA). L'idéotype de riz interspécifique « Nerica » réalise un comportement de type « adventice » (haut-gauche) spécifiquement pendant sa phase juvénile. L'intervention de l'agriculteur crée un vide temporel à remplir par la culture (niche indiquée), qui doit se comporter comme une plante rudérale.

Ce serait une grosse erreur de classer ces **trois idéotypes aquatiques** (et leur systèmes de production respectifs) comme « primitif », « avancé » et « moderne », ou les **deux idéotypes de riz pluvial** comme « primitif » et « moderne ». Chacun de ces idéotypes fait partie d'un ensemble de technologies adaptés aux conditions socio-économiques et biophysiques du lieu et de l'époque. La transition agricole qui a fait apparaître le repiquage et ultérieurement la révolution verte en Asie était certainement associée à une démographie croissante et une économie essentiellement agraire. Les technologies de ce type augmentent donc la productivité du terrain mais pas forcément celle de la main d'œuvre. J'ai été témoin de cette transition dans les zones périurbaines en Afrique de l'Ouest (exemple : Bouaké, Côte d'Ivoire), où des technologies rizicoles « asiatiques » (double culture du riz repiqué)

²⁸ Poorter H, Garnier E. 1999. Ecological significance of inherent variation in relative growth rate and its components. In : Pugnaire FI, Valladares F (Eds). Handbook of Functional Ecology. Marcel Dekkers Inc., p. 81-120.

s'installent spontanément. Par contre, il existe de grands périmètres irrigués dans les zones moins peuplées où le taux d'adoption de ces technologies reste faible malgré les subventions importantes et continues. Ces périmètres représentent donc des investissements inefficaces, résultats d'un non-respect **des règles de co-évolution des composantes du système société-culture-environnement**.

L'écophysiologie et la recherche pour le développement

La discussion précédente montre que l'écophysiologie peut occuper une place très importante dans la recherche pour le développement agricole. L'objet d'étude de cette discipline étant le fonctionnement de la plante dans son milieu, l'écophysiologiste se consacre surtout aux questions liées à l'amélioration génétique ou la gestion agronomique de la plante et de son milieu immédiat. Par contre, toutes ses contributions resteront peu pertinentes sans une insertion pluri-disciplinaire : **le cadre de référence et les critères d'évaluation seront forcément liés aux finalités très pratiques et concrètes, et l'objet d'étude ne sera qu'une composante d'un système hautement intégré** (le système de culture, le continuum recherche-développement...).

L'insertion utile de l'écophysiologie dépend donc d'un cadre valorisant, de **la capacité de l'écophysiologiste de s'intéresser aux enjeux agronomique, économique et écologique**, et de les prendre comme point de départ. Une fois ces conditions réunies, l'écophysiologiste peut contribuer au **diagnostic** (exemple : identification de la stérilité aux causes thermiques au Sahel [19]), à **l'optimisation des ITK** (exemple : gestion de l'azote pour le riz SD en Asie [37, 38, 39]) et à **l'aide à la décision** (exemple : modèle RIDEV pour l'optimisation des calendriers des cultures [21, 67]), à la **conception des nouveaux idéotypes** (exemple : NPT à l'IRRI [14, 56, 57], les Nerica à l'ADRAO [24, 32, 33]) ou à la mise au point des **outils de sélection variétale** (exemple : SLA à 14 JAS [5, 25]).

L'exemple des outils physiologiques pour la sélection variétale illustre la grande difficulté liée à la valorisation des connaissances écophysiologiques. Dans le cas de l'amélioration de la résistance du riz à la sécheresse, les activités de sélection ont toujours été accompagnées par des recherches physiologiques (exemple : mécanismes de tolérance et d'évitement). Mais les critères de sélection proposés par la physiologie, issus des recherches mécanistes-réductionnistes, sont souvent peu utiles pour le criblage de milliers de génotypes : la teneur en ABA, la sensibilité de la plante à l'ABA, l'ajustement osmotique, la conductance stomatique, la répartition des assimilats entre différents organes... (document de synthèse : IRRI 1983²⁹). Plus récemment, la perspective de la Sélection Assistée par Marqueurs (SAM), en s'appuyant sur des QTL, a donné un nouveau souffle à l'écophysiologie appliquée mais les résultats (en terme d'impact réel) sont restés décevants jusqu'à l'heure actuelle (document de synthèse : IRRI 1999³⁰).

Sur le plan des **idéotypes** la situation n'est pas très différente. La recherche écophysiologique associée à la création des variétés de la révolution verte, généralement brillante (ex : Tanaka

²⁹ IRRI. 1983. Drought resistance in crops with emphasis on rice. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, 414 pp.

³⁰ IRRI. 1999. Genetic improvement of rice for water-limited environments. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, 353 pp.

et al. 1966³¹), explique *a posteriori* le comportement de l'idéotype illustré par IR8 sans réellement avoir pu contribuer aux choix génétiques (parents, critères de sélection...).

Dans le cas des idéotypes discutés ici les recherches écophysiologiques ont précédé les interventions génétiques (cas du NPT à l'IRRI) ou elles se sont déroulées simultanément (cas des Nerica à l'ADRAO). Si leur impact (à l'heure actuelle) reste modeste par rapport aux attentes (des bailleurs de fonds, des producteurs...) il faut souligner qu'il s'agit **des projets assez exploratoires et sans précédent**. En rétrospective, on constate **surtout l'immensité de la boîte noire** située entre le génome (qu'il s'agit d'optimiser sur la base d'un raisonnement écophysiologique !) et nos modèles très imparfaits du fonctionnement de la culture dans ses milieux variables.

Ecophysiologie et génomique fonctionnelle : Vision pour un avenir proche ?

Un nouveau chantier pour l'écophysiologie s'annonce dans le cadre de la génomique fonctionnelle et de ses applications possibles pour l'amélioration génétique des cultures. Dans les analyses précédentes nous avons constaté que **la conception d'un nouvel idéotype ne peut pas s'appuyer exclusivement sur une logique écophysiologique** (fonctionnement du phénotype aux échelles du peuplement, de la plante et de l'organe). En effet, un tel projet doit également mobiliser un minimum d'information sur (1) **le contrôle génétique** des processus et variables représentés dans le modèle écophysiologique, et (2) la **diversité allélique** disponible pour les gènes d'intérêt. Il nous faut donc des modèles qui simulent le fonctionnement du phénotype à partir des contrôles exercés par le génome et par l'environnement. Dans le cas de la conception d'un idéotype, **la modélisation ne peut pas se contenter de décrire le comportement des appareils (métaboliques, hormonaux, morphologiques...) : dans leur genèse (l'ontogenèse, dont l'organogenèse fait partie) se manifeste déjà une importante plasticité adaptative. En fait, la plante, organisme stationnaire, s'adapte à son environnement surtout en modifiant sa biogenèse (biochimique, anatomique, morphologique...).**

Un modèle mécaniste (sur le plan physiologique et génétique) de la biogenèse des plantes, sensible aux variables de l'environnement, n'existe pas encore, et sa réalisation nécessitera d'abord un effort important de conceptualisation. Quel niveau de détail pour la description des processus constituant la boîte noire située entre le génome et ses manifestations phénotypiques ? Quelle structure et quel support informatique pour un modèle qui peut « grandir » avec la croissance de nos connaissances, toujours très incomplètes ? Comment coordonner les recherches pluri-disciplinaires et comment intégrer les différentes échelles d'observation ? Ces problèmes sont réels et intimidants, mais pas forcément insurmontables pour une équipe pluri-disciplinaire, motivée et bien connectée sur le plan international.

³¹ Tanaka A, Kawano K, Yamaguchi J. 1966. Photosynthesis, respiration and plant type of the tropical rice plant. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, Technical Bulletin No. 7.

Deuxième partie : Perspectives et proposition pour un programme de recherche

A - Un mot sur mon nouvel espace scientifique

Quatre ans sont écoulés depuis que j'ai quitté l'Afrique et le système international de recherche agricole pour m'installer à Montpellier au service du Cirad. Certes, ce choix m'a physiquement éloigné des terrains (mais pas forcément des enjeux !) du développement agricole dans les pays chauds, auxquels je reste vivement attaché ; mais il me présente, en revanche, des aspects scientifiques nouveaux et intéressants :

- **Sur le plan des finalités.** Mon insertion au Cirad, voisin et partenaire de l'INRA, m'a sensibilisé aux paradigmes scientifiques différents, parfois divergents, entre l'agronomie européenne et celle des pays tropicaux. Ils sont liés aux priorités agricoles différentes : qualité de l'environnement et des productions ou lutte contre la faim et la pauvreté, diversification et extensification (cultures bio) ou intensification – bref, des finalités plutôt préservatives (en Europe) ou bien interventionnistes (en Afrique), maximisant la productivité des terrains et de la main d'œuvre. En revanche, on constate aussi des grandes convergences entre ces paradigmes : objectif de durabilité, prise en compte de impacts environnementaux à l'échelle globale, le système agricole étant non seulement une usine de grains mais aussi un espace précieux partagé.
- **Sur le plan des théories scientifiques.** Certaines théories et approches développées par l'agronomie et l'écophysiologie françaises, en partie peu connues ailleurs, se distinguent par des idées très élégantes et structurantes. Je donne l'exemple de l'analyse de l'état et du fonctionnement d'un système en s'interrogeant sur son historique (sa [morpho-]genèse, les environnements vécus, les déformations subies...), au lieu de se limiter à un descriptif du fonctionnement momentané. Le concept classique d'**élaboration des rendements**³² suit cette logique rétrospective en reconstituant toute une cascade d'évènements (création et dimensionnement des puits) à partir de la structure finale de la plante observée. Ce modèle inversé est ensuite utilisé pour une **analyse heuristique** des contraintes vécues par la plante. Le modèle architectural GREENLAB³³ suit le même principe utilisant une approche mathématique. Malgré les limitations inhérentes de cette approche pour les applications agronomiques (imposition d'un nombre très restreint de lois de fonctionnement, paramétrage difficile des paramètres cachés), elle nous propose un point de vue innovant (dans le domaine écophysiologique) et des questions pertinentes : Quelles relations entre déterminismes endogènes (génétiques) et déformations exogènes d'un système ? Quel niveau d'autonomie (et donc, de compétition) à attribuer aux sous-entités (organes, agents) constituant un organisme, un système ? Quel mémoire « structurel » du passé (et quel niveau de pré-adaptation pour un stress futur) se manifeste dans les

³² Wey J, Oliver R, Manichon, H, Siband P. 1998. Analysis of local limitations to maize yield under tropical conditions. *Agronomie* 18, 545-561.

Siband P, Wey J, Oliver R, Letourmy P, Manichon, H. 1999. Analysis of the yield of two groups of tropical maize cultivars. Varietal characteristics, yield potentials, optimum densities. *Agronomie* 19, 379-394.

³³ De Reffye P, Fourcaud T, Blaise F, Barthélémy D, Houiller F. 1997. A functional model of tree growth and tree architecture. *Silva Fennica* 31(3), 297-311

Zhao X, de Reffye P, Xiong FL, Hu BG, Zhan ZG. 2001. Dual-scale Automaton Model For Virtual Plant Development. *Chinese Journal of Computers* 24(6), 608-617.

déformations, plus ou moins durables ? Pour moi personnellement, ces questions se sont précédemment posées au cours de mes travaux sur les idéotypes de riz, et j'espère que mes travaux initiés au Cirad vont me permettre de les approfondir.

- **Sur le plan méthodologique.** L'espace scientifique de l'Agropolis m'a mis en contact avec une grande pluralité d'écoles et approches de modélisation : du modèle mathématique de la morphogenèse aux modèles du contrôle génétique, du modèle élémentaire du bilan hydrique à la représentation complète des systèmes de culture, faisant appel à une plate-forme encyclopédique de formalismes...
- **Sur le plan opérationnel.** Le Cirad m'a confié la responsabilité pour l'équipe Ecotrop, et l'UMR SYSTEM me confie la participation à son directorat et l'animation d'une de ses axes thématiques. J'y reviendrai à terme. Ces responsabilités, lourdes sur les plans de programmation scientifique et d'animation, mais relativement légères sur le plan administratif, me permettront de réaliser ou animer parallèlement des projets de recherche d'orientation différente (méthodologique, analytique, agronomie appliqué...) et aux échelles variées (de la plante au système de culture). Ces travaux profiteront généralement d'un accès au terrain dans le cadre des partenariats inter-institutionnels, complétés par des milieux contrôlés (phytotron et serres) et l'espace « virtuel » de modélisation. Le travail en partenariat (transversalité) est essentiel et fortement encouragé, nécessitant la recherche de financement externes.

Ensemble, ces paramètres décrivent une espace scientifique ouverte et riche pour la conduite des recherches innovantes.

B - Stratégie

Vers une nouvelle approche de modélisation

Dans l'esprit décrit ci-haut, mes activités de recherche resteront axés sur les objectifs suivants:

- L'étude du fonctionnement des cultures et systèmes de cultures à l'échelle de la parcelle cultivée et de la plante
- Une écophysiologie consacrée à une valorisation concrète de ses produits pour le développement agricole, particulièrement dans les pays du sud,
- L'intégration du génotype, et de son amélioration, dans les recherches agronomiques, et
- Le développement et l'utilisation des modèles comme outil d'intégration de différentes échelles et niveaux de détail, de représentation des systèmes complexes et dynamiques, d'expérimentation virtuelle et d'extrapolation.

Ce dernier point, l'intégration de la modélisation dans toutes les phases d'un projet de recherche, me semble particulièrement important. Mes projets de recherche introduiront le

comportement écophysologique des génotypes spécifiques dans le raisonnement agronomique, nécessitant des modèles sensibles à ces spécificités génotypiques et à leur expression variée selon l'environnement biophysique. La création d'une nouvelle génération de modèles est visée, capables de simuler la plasticité phénotypique, ou les déformations adaptatives, des plantes cultivées. Par rapport aux modèles couramment utilisés, les nouveaux modèles substitueront des fonctions « prescriptives » (ex. : coefficients fixes de répartition des assimilats entre organes) par une morphogenèse subie au jeu de compétition entre puits (initiation et dimensionnement des nouveaux puits en fonction de l'état trophique de la plante). Ce concept de modélisation, en cours de réalisation dans mon équipe au Cirad, sera adapté aux différentes échelles et niveaux de détail demandés par les finalités concrètes des projets de recherche. On reviendra à ces concepts dans la section C de ce chapitre.

Deux cadres et stratégies de recherche

Il est dans la nature des recherches finalisées (exemple : cadre du développement) qu'elles s'adaptent à l'évolution de la demande (observée directement dans les filières ou interprétée par des bailleurs de fonds). Les choix thématiques doivent s'adapter également aux avantages comparatifs du laboratoire, seul ou en partenariat avec d'autres, pour mener au bout ses engagements. Je ne présenterai donc que des stratégies de recherche sans proposer des options aux issues difficilement prévisibles.

Deux stratégies de recherche complémentaires seront réalisées parallèlement, l'une contribuant à remplir le vide méthodologique entre **la génomique fonctionnelle et le fonctionnement phénotypique des idéotypes** (*Stratégie 1*, dans le cadre du projet A2BC), et l'autre visant à **modéliser le fonctionnement de cultures et leur insertion dans les systèmes de culture** et le milieu biophysique (*Stratégie 2*, dans le cadre de l'UMR SYSTEM à Montpellier).

La *Stratégie 1* sera réalisée à l'exemple du riz (plante pilote) dans le cadre d'un nouveau projet transversal "de la parcelle au génome", baptisé **A2BC**. Cet acronyme regroupe quatre programmes du Cirad (Agronomie, AMAP, Biotrop, Calim), mais les partenariats scientifiques dépasseront largement le cadre ciradien : en France l'IRD et l'INRA (laboratoire LEPSE à Montpellier), sur le plan international l'IRRI (Philippines), le FOFIFA (Madagascar), le China Agricultural University (Chine)... Ce projet regroupe des compétences importantes dans les champs de la **génétique moléculaire et classique**, la **physiologie moléculaire**, l'**écophysologie**, l'**agronomie**, la **modélisation architecturale** et les **mathématiques appliquées**. Les contributions de mon équipe et moi-même sont de nature méthodologique et visent à développer des modèles du fonctionnement des idéotypes à partir des connaissances sur la génomique fonctionnelle, en cours d'acquisition. Un des produits attendus est un modèle écophysologique de la morphogenèse et du fonctionnement du riz dans son milieu (divers écosystèmes cultivés) dont les paramètres correspondent aux gènes précis, et les valeurs de ces paramètres correspondent aux allèles. **Ce modèle permettra de confronter des génotypes virtuels aux diverses situations, et prendra en compte l'expression conditionnelle des gènes, constituant un élément important de la plasticité phénotypique.**

La *Stratégie 2* s'inscrit dans l'**UMR SYSTEM** (Systèmes de Cultures Tropicaux Et Méditerranéens), plus précisément son **Axe 1** (analyse et modélisation du fonctionnement du champ cultivé et des systèmes de culture), que j'anime. Comme dans la *Stratégie 1*, il s'agit surtout des recherches méthodologiques, basées sur une nouvelle boîte à outils pour la modélisation (**Ecosys**, approche « objet » facilitant le montage des modèles à partir d'une

librairie de formalismes). Il s'agit généralement des modèles simples à partir d'une phénologie (type déterminé, indéterminé, pérenne-ligneux...) couplée avec des bilans d'énergie, de carbone, de l'eau (liste ouverte). Comme dans *Stratégie 1*, on appliquera progressivement un concept d'élaboration souple (plastique) de la culture et de son rendement.

La *Stratégie 2* s'appuie sur nombreux partenariats centrés sur le site de Montpellier (filiales du Cirad, IRD, INRA Montpellier et Avignon, ENSAM, le CFR en Camargue...) ou internationaux (CERAAS au Sénégal, IER au Mali, Université de Kasetsart en Thaïlande...).

Les deux stratégies se complètent malgré leurs échelles et finalités différentes. La *Stratégie 1* fournira au fur et à mesure des concepts pour la modélisation simplifiée de la plasticité phénotypique (l'ensemble des déformations utiles du phénotype) et d'autres éléments génériques utilisables dans la plate-forme Ecosys. La *Stratégie 2* apportera au projet A2BC un cadre souple de modélisation pour transporter ses résultats dans un cadre agronomique (du phénotype à la parcelle cultivée), avec une composante forte de création et valorisation de variétés.

Les deux stratégies sont riches en éléments novateurs et vont donc fournir un grand nombre de thèmes "thésables". La valorisation des résultats s'appuiera surtout sur la publication d'articles dans des revues scientifiques à comité international de lecture, mais aussi sur une diffusion des produits sous forme de formations (application des modèles et autres outils de recherche).

C - Thématiques scientifiques privilégiées

Un thème porteur au travers les deux stratégies de recherche sera l'étude **des relations de compétition** entre les entités constituant un système, ainsi que leur modélisation et simulation. On observe une compétition pour les ressources vitales non seulement entre les individus d'un peuplement végétal, homogène ou mixte, mais aussi entre les organes d'une plante individuelle. Dans tous les cas, la contrainte déforme le système, soit d'une façon stabilisante (adaptative, si l'échelle est celle de la plante) ou déstabilisante. Les **déformations** peuvent affecter les dimensions et le fonctionnement des entités et/ou leur nombre. Le système possède donc une certaine plasticité, ou élasticité si les déformations sont réversibles. Cette **plasticité-élasticité** (ou adaptabilité, souplesse, robustesse...) est aujourd'hui très recherchée à l'échelle du système de culture et également à l'échelle de la plante (le géotype, la variété).

En Europe, la tendance lourde vers l'extensification des systèmes (diversification, gestion moins interventionniste : cas extrême la culture bio) fait appel à une nouvelle robustesse et souplesse des variétés et des pratiques. En Asie, la préciosité croissante de l'eau d'irrigation exige également une gestion plus conservatrice et des variétés de riz plus adaptable, et la pression progressive des adventices et l'indisponibilité de la main d'œuvre les nécessitent depuis longtemps en Afrique.

Ce genre de considérations a motivé la nouvelle UMR « SYSTEM » de privilégier l'étude des systèmes de **cultures complexes et diversifiés**, et le nouveau projet transversal A2BC de privilégier l'étude de la **capacité colonisatrice des phénotypes** (« vigueur au départ » et

compétitivité). Dans le premier cas on s'intéressera surtout au prélèvement et partage des ressources par les éléments d'un peuplement, homogène ou mixte. Dans le second cas, l'accent est plus sur la variabilité du partage des ressources entre les puits à l'échelle de la plante. Admettons que les relations de compétition inter et intra-plante ne suivent pas les mêmes règles de fonctionnement, et sont classiquement étudiées par des spécialistes de disciplines distincts (écologie classique, malherbologie, écologie fonctionnelle, écophysiologie... selon le problème). Je ne propose donc pas de couvrir personnellement tous ces domaines. Par contre, **il me semble nécessaire et réaliste que l'écophysiologie développe des modèles capables de mieux simuler la compétitivité des plantes, fonction du génotype, du milieu et de la proximité et structure de leurs voisins**³⁴. Pour ce faire, les modèles doivent mieux représenter les déterminismes physiologiques et morphologiques de la vitesse de colonisation des ressources, et également de la plasticité adaptative de la structure et du fonctionnement des phénotypes. Enfin, l'essentiel de ces formalismes doit être porté sous forme simplifiée dans des modèles intégratives « sommaires », afin d'étudier leurs expressions aux échelles du peuplement et du système de cultures.

Un certain nombre de projets déjà mis en route sur le sujet de la plasticité phénotypique confirme la pertinence du sujet : La modélisation pluri-annuelle du palmier à huile, plante ayant une plasticité morphologique très limitée, souligne le rôle des réserves carbonées comme défense de la plante contre les déformations provoquées par le milieu. Ces résultats ont motivés l'initiation d'un ATP sur le rôle des réserves carbonées dans quatre les grandes cultures pérennes tropicales. Un autre exemple, des études sur la plasticité architecturale et morphologique du système racinaire des céréales, et de la répartition des assimilats entre les organes, sont en cours sur l'exemple de la compaction, de l'acidité et de la carence en P du sol. Finalement, un projet de thèse a été initié sur le contrôle génétique de la plasticité morphologique du système racinaire du riz. Ces études préciseront nos hypothèses sur les interactions entre la morphogenèse de la plante et les contraintes du milieu, et permettront de formuler des modèles génériques du fonctionnement.

D - Participation dans le montage d'une unité mixte de recherche

J'ai activement participé dans le montage de l'UMR-SYSTEM, intégrant en partie mon équipe Ecotrop dans cette structure et acceptant le rôle d'animateur pour un de ses trois axes thématiques. Pour les équipes du Cirad, l'insertion dans une UMR marque à la fois une ouverture (vers le haut niveau scientifique liée à l'enseignement supérieur et la possibilité, pour les chercheurs habilités, de diriger des thèses) et l'abandon progressif d'un fonctionnement ancien. Au centre de ce fonctionnement ancien, je caricature, se trouve l'agronome expatrié du Cirad qui installe chez les partenaires du Sud une culture scientifique et des actions raisonnées de recherche, dans un environnement humain peu éveillé à cet esprit. Cet expert est appuyé par les laboratoires du siège à Montpellier, regroupés aujourd'hui sous forme du département Amis (Appui Méthodologique et Innovation Scientifique).

³⁴ Des recherches récentes de l'INRA (C Dupraz, membre de l'UMR-SYSTEM) montre que qu'ils existent aussi des synergies entre plantes voisines, stimulant leur croissances. Ce type de phénomènes, pas inconnu mais peu étudié, sera considéré comme sujet d'étude suite à la confirmation de sa pertinence agronomique dans le cadre de l'UMR.

Ce fonctionnement ancien, basé sur un haut niveau d'autonomie scientifique de l'organisme et sur la notion forte d'une mission, se trouve aujourd'hui mis en cause par plusieurs développements :

- Malgré le fait que **la réalité du sous-développement persiste**, les organismes **partenaires dans les pays du Sud ont atteint un haut niveau technique et scientifique** -- souvent, dans certains secteurs, comparable à celui du Cirad.
- **La mondialisation de la recherche pour le développement** entraîne une compétition forte pour les financements, et pour le rôle de « leader » dans les différents domaines de recherche.
- **L'évolution rapide des technologies modernes de recherche** (techniques moléculaires, modélisation et biomathématiques, télédétection...) et la nécessité de poursuivre à la fois une démarche « qualité » et « innovation » dépassent progressivement capacités « maison » d'un seul organisme. La nécessité de définir de nouvelles formes de partenariats et cadres durables de collaboration s'impose.

La création d'un cadre durable pour la collaboration entre les équipes du Cirad et les établissements d'enseignement supérieur s'impose. En effet, les secteurs d'enseignement (universités, grandes écoles...) et le Cirad se complètent : le secteur d'enseignement cherche à améliorer son accès aux thèmes et terrains liés au développement dans les pays du sud, et le Cirad (et également l'IRD) cherche à améliorer la qualité et l'impact de ses recherches (en terme de publications et d'influence dans la communauté internationale) en participant plus directement aux formations doctorales. Ces objectifs peuvent être atteints dans le cadre des UMR – sous condition qu'une masse critique de chercheurs habilités pour la direction de la recherche (HDR) est disponible.

C'est dans cette logique que je me suis investi dans l'UMR SYSTEM (et en conséquence dans ce projet d'habilitation). Cette UMR n'est pas la première à laquelle le Cirad s'associe, mais elle est la première qui s'adresse au cœur du mandat thématique du Cirad : l'agronomie, les systèmes de cultures. Une UMR aussi qui franchit le cadre du département Amis du Cirad, en associant un grand nombre de chercheurs ciradiens expatriés et de partenaires dans les pays du Sud.

Dans le cadre de l'UMR SYSTEM je souhaite réaliser un nouvel équilibre entre les activités des recherches finalisées et l'enseignement supérieur, notamment la direction des thèses, dans l'intérêt d'une meilleure production scientifique.

E - Cadre institutionnel, partenariats et moyens pour la recherche

L'équipe Ecotrop au sein du programme Agronomie (département AMIS du Cirad : Appui Méthodologique et Innovation Scientifique) se spécialise sur l'analyse et la modélisation du fonctionnement des cultures. En 2002, cette équipe de 13 personnes (dont 10 chercheurs) s'est inscrite quasi intégralement dans l'UMR SYSTEM (SYStèmes de culture Tropicaux Et

Méditerranéens). Cette UMR, composée de chercheurs du Cirad, de l'INRA, de l'ENSAM et de l'IRD, regroupe trois axes de recherche dont j'anime le premier³⁵ :

Axe 1 : analyse et **modélisation du fonctionnement** du champ cultivé et des systèmes de culture.

Axe 2 : connaissances et outils pour **l'évaluation** des systèmes de culture.

Axe 3 : connaissances et outils pour **la conception et le pilotage** des systèmes de culture.

L'échelle privilégiée de travail est celle de la parcelle cultivée et du peuplement végétal. Elle est donc cohérente avec la *Stratégie 2* évoquée dans le chapitre précédent. Le rapport avec le milieu réel est assuré par un grand nombre de chercheurs expatriés du Cirad qui sont rattachés à l'UMR. Des alliances stratégiques entre l'UMR et certains organismes de recherche ou de développement dans les pays du sud n'ont pas encore été élaborées mais sont prévues (ex : avec le CERAAS au Sénégal).

L'équipe Ecotrop s'est également engagée à participer dans le projet A2BC déjà présenté dans le cadre de la *Stratégie 1*. Ce projet transversal profite de sa proximité scientifique avec quatre unités mixte de recherche à Montpellier dont l'UMR SYSTEM, l'UMR GACA (Génomique Appliquée aux Caractères Agronomiques), l'UMR AMAP (Botanique et Bio-informatique de l'Architecture des Plantes) et l'UMR LEPSE (Laboratoire de l'Ecophysiologie des Plantes sous Stress Environnemental). Le projet profite aussi des alliances stratégiques avec l'IRRI (Philippines) et également de bonnes relations avec les deux autres CIRA travaillant sur le riz, le CIAT (Colombie) et l'ADRAO (Côte d'Ivoire).

Les perspectives pour la réalisation des deux stratégies de recherche proposées sont bonnes. L'engagement durable du Cirad pour le projet A2BC est manifeste dans le recrutement de 5 chercheurs (dont 4 écophysiologistes) en CDI en 2002 dont un pour Ecotrop. L'engagement durable du Cirad dans l'UMR SYSTEM est manifeste, par exemple, dans l'accueil physique de la plupart des chercheurs de l'UMR sur le campus du Cirad à Lavalette.

Ces informations montrent que les deux stratégies de recherche proposées profiteront d'une bonne capacité d'accueil pour des thésards et post-doctorants, ainsi qu'une variété riche de sujets thésables. Par contre, on note un nombre très limité de chercheurs habilités pour la direction des recherches, problème effectivement limitant l'accueil de nouveaux doctorants.

³⁵ Suite à son évaluation externe et sa confirmation en juillet-octobre 2002, les axes scientifiques de l'UMR-SYSTEM seront redéfinis. Ces modifications, qui affecteront peu les grandes orientations de l'UMR, se sont pas pris en compte dans ce mémoire.

Troisième partie : Activités d'enseignement, relations avec le monde professionnel

A – Encadrement de projets de thèse et de stages diplômants

Stages diplômants

N'ayant jamais travaillé pour un établissement de formation supérieure et ne possédant pas l'Habilitation à Diriger des Recherches, je n'ai pas eu l'opportunité de diriger formellement des thèses. Par contre, dans le cadre de mes recherches chez les centres internationaux de recherche agricole (IRRI et ADRAO) et le Cirad, j'ai effectivement pu initier et encadrer huit projets de thèse dont quatre sont terminés (tableau 3).

Tableau 3. Projets de thèses encadrés

<u>Nom du thésard</u>	<u>Directeur De thèse</u>	<u>Etablissement d'enseignement et année de Soutenance</u>	<u>Sujet</u>	<u>Publications</u>	
				<u>Revue A</u> <u>Acceptés/</u> <u>Soumis</u>	<u>Autres articles</u>
Folkart Asch	Karl Dörffling	Université de Hambourg (D), 1997	Physiologische Faktoren der Salzresistenz bei Reis (<i>Oryza sativa</i> L.) (Facteurs physiologiques de la résistance du riz à la salinité)	3/0 (No. 2, 3, 4)	3
Moussa Sié	Jacques Wéry	ENSAM à Montpellier, 1997	Analyse des contraintes photothermiques en vue de l'adaptation des variétés de riz irrigué au Sahel	3/0 (No. 40, 41, 42)	0
Florent Tivet	Bertrand Ney	Paris XI et INA-PG, 2000	Etude des facteurs génotypiques et environnementaux déterminant la mise en place de la surface foliaire chez le riz (<i>O. sativa</i> et <i>O. glaberrima</i>). Incidence particulière d'un déficit hydrique.	1/3 (No. 46, 53, 54, 55)	1
Julie Dusserre	Yves Crozat	Université de Marseille, 2001	Incidence d'une réduction de l'intensité lumineuse sur les ajustements de puits, la répartition des assimilats et sur les composantes du rendement et de la qualité des fibres du cotonnier	1/0 (No. 28)	0
Tagro Guei	Guy Moulin	Prévue à Montpellier II en 2003	Mise en évidence d'une activité lipasique et de son impact sur la qualité du cacao	0/0	0
Benoît Clerget	Bertrand Ney	Prévue à Paris XI en 2003	Développement d'un idéotype de sorgho pour le Sahel (titre préliminaire)	0/1 (No. 48)	0
Isabelle Mialet-Serra	Pierre Siband (prévu: M. Dingkuhn)	Prévue à Montpellier II en 2004	Elaboration d'un modèle de fonctionnement et de prévision du rendement de <i>Cocos nucifera</i> : Rôle des réserves carbonées face à la variabilité du climat.	0/0	0
Julia Rebouillat	JC Glaszmann	Prévue à Montpellier II en 2005	Contrôle génétique et environnemental de la morphologie et de l'architecture du système racinaire du riz	0/0	0

J'ai également encadré plusieurs autres stages diplômants, dont trois stages de DEA en 2002 :

Tableau 4 : Stages de DEA et DESS encadrés

Nom du stagiaire	Etablissement d'enseignement	Intitulé du mémoire
Benoît Clerget (DEA, 1999)	Paris VI / INA-PG	Etude comparée de la croissance et du développement de deux variétés de sorgho de races caudatum et guinea
Jérôme Hemberger (DESS, 2001)	Université de Corse, Corté	Effet de la photopériode sur le plastochrone, le phyllochrone et la date d'initiation paniculaire de trois variétés de sorgho de race caudatum et guinea
Gaëtan Louarn (DEA, 2002)	ENSAIA à Nancy	Caractérisation et modélisation de la réaction photopériodique chez le sorgho
Aude Pelletier (DEA, 2002)	Université de Rennes	Caractérisation et modélisation des effets de compacité et acidité du sol sur la croissance du système racinaire chez le maïs
Julia Rebouillat (DEA, 2002)	Paris XI / INA-PG	Phénotypage et génotypage de caractères liés à la vigueur du départ chez le riz (<i>O. sativa</i> et <i>O. glaberrima</i>)
Fanjay Rana... (DEA, 2003)	ENSAIA à Nancy	Analyse des QTL et caractérisation phénotypique des descendants d'un croisement variétal chez le riz (Azucena*IR64): effets de la carence en P sur la morphogenèse végétative – système racinaire.
Kim Hae Koo (DUAPS, 2003)	Université Paul et Marie Curie, Paris Jussieu	Analyse des QTL et caractérisation phénotypique des descendants d'un croisement variétal chez le riz (Azucena*IR64): effets de la carence en P sur la morphogenèse végétative – partie aérienne.

Devenir des stagiaires encadrés

Parmi les quatre stagiaires de DEA encadrés depuis mon arrivé au Cirad (tableau 4 ; sans compter les stages en cours), deux ont commencé un projet de thèse sous mon encadrement (B. Clerget et J. Rebouillat ; tableau 3), un a commencé une thèse au LEPSE à Montpellier (G. Louarn) et un est parti dans la vie professionnelle sans poursuite d'un doctorat (A. Pelletier). Parmi mes quatre thésards qui ont déjà soutenus leur thèse (tableau 3), deux ont obtenus un emploi au Cirad et se trouvent actuellement en expatriation professionnelle (F. Tivet, Laos ; J. Dusserre, Madagascar), un est rentré dans son pays natal pour reprendre son poste de sélectionneur de riz (M. Sié au Burkina Faso), et un poursuit une carrière universitaire (F. Asch). Effectivement, M Asch a d'abord réalisé un post-doctorat sous ma supervision à l'ADRAO en Côte d'Ivoire, avant d'accepter un CDD à l'université de Copenhague. Il occupe maintenant le poste d'« assistant professor » (Wissenschaftlicher Assistent) à l'université de Bonn en Allemagne.

B - Activités d'enseignement

Mes contributions à l'enseignement, assez restreintes par rapport à mes activités de recherche, se regroupent en deux parties, les formations académiques et professionnelles. Elles seront rapidement résumées :

Formations académiques

- Conduite contractuelle d'un cours de botanique générale (système des plantes et morphologie comparative), 2 semestres en 1979/80 à l'université de Hambourg, pour les étudiants du 2^{ème} au 4^{ème} semestre universitaire.
- Participation dans la conduite du module SYSMOD, partie modélisation du bilan hydrique des cultures, dans le cadre du DAA-environnement à l'ENSAM en 2001 et 2002

Formations professionnelles

- Participation régulière dans la conduite des formations pour des techniciens et jeunes chercheurs dans les champs de la physiologie végétale, de l'agronomie et de la sélection variétale ; de 1991 à 1998 au sein de l'Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest (ADRAO) à Bouaké (Côte d'Ivoire) et à Ibadan (Nigéria).
- Initiation des formations professionnelles annuelles au sein de l'équipe Ecotrop, pour des techniciens et chercheurs (agronomes et sélectionneurs), avec participation active dans la conduite :
 - Cours « Ecobio » (2001 et 2002) : Méthodes écophysiologiques et biochimiques pour le diagnostic de l'état physiologique de la plante
 - Cours de modélisation sur la base de SARRAH (2002)

C - Relations avec la communauté scientifique internationale

Grâce à mes travaux au sein des centres internationaux de recherche agricole je crois occuper une place assez reconnue dans la communauté scientifique internationale, qui s'exprime dans ma fonction de relecteur pour plusieurs revues de rang A (encadré) et des sollicitations régulières (conférences invitées, participation dans des audits scientifiques externes, expertises...). Par contre, mon insertion dans le monde scientifique francophone est toujours un peu ponctuelle et partielle, mais s'améliore progressivement depuis mon arrivée en France il y a presque quatre ans.

Je suis relecteur régulier des revues de rang A suivantes :

Field Crops Research (Elsevier)

Agricultural Systems (Elsevier)

Euphytica (Elsevier)

Agronomie (INRA)

Plant Production Science (PPS, Japan)

Mes bonnes relations avec le monde scientifique international, et avec la culture scientifique anglo-saxonne en particulier, m'aideront à mieux positionner et valoriser sur le plan international les recherches de mon équipe et de mes collaborateurs et thésards à Montpellier.

Productions scientifiques

Liste des Interventions en 1^{er} auteur dans les revues à comité de lecture

(IF = « Impact Factor »)

No	Revue	IF 2001	Auteurs	Année	Vol., pages
9	<i>Australian Journal of Agricultural Research</i>	0.902	Dingkuhn, M. , R.T. Cruz, J.C. O'Toole, Doerffling	1989	40, 1171-1181
16	<i>Australian Journal of Agricultural Research</i>	0.902	Dingkuhn, M. , G. Farquhar S.K. De Datta	1991	42, 1123-31
11	<i>Australian Journal of Agricultural Research</i>	0.902	Dingkuhn, M. , S.K. De Datta, K. Doerffling, C. Javellana	1990	40, 1183-1192
13	<i>Australian Journal of Plant Physiology</i>	1.562	Dingkuhn, M. , H.F. Schnier, S.K. De Datta, E. Wijangco, and K. Doerffling	1990	17, 119-134
19	<i>Agricultural Systems</i>	0.815	Dingkuhn, M. , A. Sow, A. Samb, S. Diack, F. Asch	1995	48, 385-410
20	<i>Agricultural Systems</i>	0.815	Dingkuhn, M. , K.M. Miezán	1995	48, 411-434
21	<i>Agricultural Systems</i>	0.815	Dingkuhn, M.	1995	48, 435-456
23	<i>Agricultural Systems</i>	0.815	Dingkuhn, M.	1996	52, 383-397
14	<i>Crop Science</i>	0.807	Dingkuhn, M. , H.F. Schnier, S.K. De Datta, K. Doerffling, C. Javellana	1990	30, 1284-1292
27	<i>Euphytica</i>	0.765	Dingkuhn, M. , F. Asch	1999	110, 109-126
10	<i>Field Crops Research</i>	1.379	Dingkuhn, M. , R.T. Cruz, J.C. O'Toole, N.C. Turner, K. Doerffling	1991	27, 103-117
15	<i>Field Crops Research</i>	1.379	Dingkuhn, M. , H.F. Schnier, S.K. De Datta, K. Doerffling, C. Javellana	1991	26, 327-345
17	<i>Field Crops Research</i>	1.379	Dingkuhn, M. , H.F. Schnier, C. Javellana, R. Pamplona, S.K. De Datta	1992	28, 223-34
18	<i>Field Crops Research</i>	1.379	Dingkuhn, M. , H.F. Schnier, C. Javellana, R. Pamplona, S.K. De Datta	1992	28, 235-49
22	<i>Field Crops Research</i>	1.379	Dingkuhn, M. , P.-Y. Le Gal	1996	46, 117-126
24	<i>Field Crops Research</i>	1.379	Dingkuhn, M. , M.P. Jones, D.E. Johnson, A. Sow	1998	57, 57-69
25	<i>Field Crops Research</i>	1.379	Dingkuhn, M. , D.E. Johnson, A. Sow, A.Y. Audebert	1999	61, 79-95
26	<i>Field Crops Research</i>	1.379	Dingkuhn, M. , A. Audebert, A. Sow, K. Etienne, M.P. Jones	1999	61, 223-236
Somme des « Impact Factors » (1 ^{er} auteur)		20.132			
(Somme totale des pour les interventions en premier auteur ou co-auteur : 46.774)					

Liste de publications

Revue à comité de lecture (articles apparues)

1. Asch, F., K. Doerffling, **M. Dingkuhn**. 1995. Response of rice varieties to soil salinity and air humidity: a possible involvement of root-borne ABA. *Plant and Soil* 177, 11-19.
2. Asch F., **M. Dingkuhn**, K. Dorffling, 2000. Salinity increases CO₂ assimilation but reduces growth in field-grown, irrigated rice. *Plant and Soil* 218, 1-10.
3. Asch F., **M. Dingkuhn**, C. Wittstock, K. Dorffling, 1999. Sodium and potassium uptake of rice panicles as affected by salinity and season in relation to yield and yield components. *Plant and Soil* 207, 133-145.
4. Asch F., **Dingkuhn M.**, Dorffling K., Miezian K. 2000. Leaf K/Na ratio predicts salinity induced yield loss in irrigated rice. *Euphytica* 113, 109-118.
5. Asch, F., A. Sow, **M. Dingkuhn**. 1999. Reserve mobilization, dry matter partitioning and specific leaf area in seedlings of African rice cultivars differing in early vigor. *Field Crops Res.* 62, 191-202.
6. Audebert, A., D.L. Coyne, **M. Dingkuhn** and R.A. Plowright. 2000. The influence of cyste nematodes (*Heterodera sacchari*) and drought on water relations and growth of upland rice in Cote d'Ivoire. *Plant and Soil* 220, 235-242.
7. Cruz, R.T., J.C. O'Toole, **M. Dingkuhn**, E.B. Yambao, M. Thangaraj, S.K. De Datta. 1986. Shoot and root responses to water deficits in rainfed lowland rice. *Aust. J. Plant Physiol.* 13, 567-575.
8. **Dingkuhn, M.**, K. Doerffling, A. Tietz. 1983. Regulation of sucrose transport in barley by abscisic acid. *Acta Hort.* 134, 15-25.
9. **Dingkuhn, M.**, R.T. Cruz, J.C. O'Toole, Doerffling. 1989. Net photosynthesis, water use efficiency, leaf water potential, and leaf rolling as affected by water stress in tropical upland rice. *Aust. J. Agric. Res.* 40, 1171-1181.
10. **Dingkuhn, M.**, R.T. Cruz, J.C. O'Toole, N.C. Turner, K. Doerffling. 1991. Responses of seven diverse rice cultivars to water deficits. III. Accumulation of abscisic acid and proline in relation to leaf water potential and osmotic adjustment. *Field Crops Res.* 27, 103-117.
11. **Dingkuhn, M.**, S.K. De Datta, K. Doerffling, C. Javellana. 1990. Varietal differences in leaf water potential, leaf net CO₂ assimilation, conductivity, and water use efficiency in upland rice. *Aust. J. Agr. Res.* 40, 1183-1192.
12. **Dingkuhn, M.**, H.F. Schnier, S.K. De Datta. 1989. Effect of plow pan depth on rice yield. *Intl. Rice Res. Newslet.* 14, 22.
13. **Dingkuhn, M.**, H.F. Schnier, S.K. De Datta, E. Wijangco, and K. Doerffling. 1990. Diurnal and developmental changes in canopy gas exchange in relation to growth in transplanted and direct seeded flooded rice. *Aust. J. Plant Physiol.* 17, 119-134.
14. **Dingkuhn, M.**, H.F. Schnier, S.K. De Datta, K. Doerffling, C. Javellana. 1990. Nitrogen fertilization of direct-seeded vs. transplanted rice: II. Interactions among canopy properties. *Crop Sci.* 30, 1284-1292.
15. **Dingkuhn, M.**, H.F. Schnier, S.K. De Datta, K. Doerffling, C. Javellana. 1991. Relationship between ripening phase productivity and crop duration, canopy photosynthesis and senescence in transplanted and direct seeded lowland rice. *Field Crops Res.* 26, 327-345.
16. **Dingkuhn, M.**, G. Farquhar S.K. De Datta. 1991. Discrimination of ¹³C among upland rice having different water use efficiencies. *Aust. J. Agric. Res.* 42, 1123-31.

17. **Dingkuhn, M.**, H.F. Schnier, C. Javellana, R. Pamplona, S.K. De Datta. 1992. Effect of late season nitrogen application on canopy photosynthesis and yield of transplanted and direct seeded tropical lowland rice. I. Growth patterns and yield components. *Field Crops Res.* 28, 223-34.
18. **Dingkuhn, M.**, H.F. Schnier, C. Javellana, R. Pamplona, S.K. De Datta. 1992. Effect of late season nitrogen application on canopy photosynthesis and yield of transplanted and direct seeded tropical lowland rice. II. Canopy stratification at flowering stage. *Field Crops Res.* 28, 235-49.
19. **Dingkuhn, M.**, A. Sow, A. Samb, S. Diack, F. Asch. 1995. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. I. Photothermal and microclimatic responses of flowering. *Agricultural Systems* 48, 385-410.
20. **Dingkuhn, M.**, K.M. Miezán. 1995. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. II. Validation of photothermal constants and characterization of genotypes. *Agricultural Systems* 48, 411-434.
21. **Dingkuhn, M.** 1995. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. III. Characterizing environments by simulating the crop's photothermal responses. *Agricultural Systems* 48, 435-456.
22. **Dingkuhn, M.**, P.-Y. Le Gal. 1996. Effect of drainage date on yield and dry matter partitioning in irrigated rice. *Field Crops Res.* 46, 117-126.
23. **Dingkuhn, M.** 1996. Modelling concepts for the phenotypic plasticity of dry matter and nitrogen partitioning in rice. *Agric. Syst.* 52, 383-397.
24. **Dingkuhn, M.**, M.P. Jones, D.E. Johnson, A. Sow. 1998. Growth and Yield potential of *Oryza sativa* and *O. glaberrima* Upland Rice Cultivars and their Interspecific Progenies. *Field Crops Res.* 57, 57-69.
25. **Dingkuhn, M.**, D.E. Johnson, A. Sow, A.Y. Audebert. 1999. Relationship between upland rice canopy characteristics and weed competitiveness. *Field Crops Res.* 61, 79-95.
26. **Dingkuhn, M.**, A. Audebert, A. Sow, K. Etienne, M.P. Jones. 1999. Control of stomatal conductance and leaf rolling in *O. sativa* and *O. glaberrima* upland rice. *Field Crops Res.* 61, 223-236.
27. **Dingkuhn, M.**, F. Asch. 1999. Phenological responses of *Oryza sativa*, *O. glaberrima* and inter-specific rice cultivars on a toposequence in West Africa. *Euphytica* 110, 109-126.
28. Dusserre J, Crozat Y, Warembourg FR, **Dingkuhn M.** 2002. Effects of shading on sink capacity and yield components of cotton in controlled environments. *Agronomie*, in press (MS 01. 064, accepté 18 oct 2001).
29. Flores, A., K. Doerffling, **M. Dingkuhn.** 1989. A new phytohormone analogue promotes leaf photosynthetic rate of rice after chilling. *Intl. Rice Res. Newslet.* 14, 17-18.
30. Graf, B., **M. Dingkuhn**, F. Schnier, V. Coronel, S. Akita. 1991. A simulation model for the dynamics of rice growth and development: III. Validation of the model with high-yielding varieties. *Agricultural Systems* 36, 329-349.
31. Ingram, K.T., **M. Dingkuhn**, R.P. Novero, E.W. Wijangco. 1990. Growth and CO₂ assimilation of lowland rice in response to timing and method of N fertilization. *Plant and Soil* 132, 113-125.
32. Johnson, D.E., **M. Dingkuhn**, M.P. Jones, M.C. Mahamane. 1998. The influence of rice plant type on the effect of weed competition on *O. sativa* and *O. glaberrima*. *Weed Res.* 38, 207-216.
33. Johnson, D.E., M.P. Jones, **M. Dingkuhn.** 1998. Reducing weeding needs of African upland rice farmers - is new technology the answer? *Tropical Agriculture Association Newsletter* 18, 21-22.

34. Johnson, D. E.; **Dingkuhn, M.**; Fomba, S. N.; Morales, F. 1998. Incidence of rice stripe necrosis virus in upland rice in West Africa. *International Rice Research Notes* 23(3), 25-26.
35. Jones, M.P., **Dingkuhn, M.**, Aluko, G.K., Semon, M. 1997. Interspecific *O. sativa* L. x *O. glaberrima* Steud. progenies in upland rice improvement. *Euphytica* 92, 237-246.
36. O'Toole, J.C., N.C. Turner, O.P. Namuco, **M. Dingkuhn**, K.A. Gomez. 1984. Comparison of some crop water stress measurement methods. *Crop Sci.* 24, 1121-1128.
37. Schnier, H.F., **M. Dingkuhn**, S.K. De Datta, K. Mengel, E. Wijangco, C. Javellana. 1990. Nitrogen economy and canopy CO₂ assimilation in tropical lowland rice. *Agron. J.* 82, 451-459.
38. Schnier, H.F., **M. Dingkuhn**, S.K. De Datta, K. Mengel, J.E. Faronilo. 1990. Response of direct seeded and transplanted flooded rice to nitrogen fertilization: I. Plant nitrogen uptake, canopy photosynthesis, growth and yield. *Crop Sci.* 30, 1276-1284.
39. Schnier, H.F., **M. Dingkuhn**, S.K. De Datta, K. Mengel, E.P. Marqueses, J.E. Faronilo. 1990. Nitrogen-15 balance in transplanted and direct seeded flooded rice as affected by urea band placement. *Biol. Fert. Soils.* 10, 89-96.
40. Sie, M., **M. Dingkuhn**, M.C.S. Wopereis, K.M. Miezán. 1998. Rice crop duration and leaf appearance rate in a variable thermal environment. I. Development of an empirically based model. *Field Crops Research* 57, 1-13.
41. Sie, M., **M. Dingkuhn**, M.C.S. Wopereis, K.M. Miezán. 1998. Rice crop duration and leaf appearance rate in a variable thermal environment. II. Comparison of genotypes. *Field Crops Research* 58, 129-140.
42. Sie, M., **M. Dingkuhn**, M.C.S. Wopereis, K.M. Miezán. 1998. Rice crop duration and leaf appearance rate in a variable thermal environment. III. Heritability of photothermal traits. *Field Crops Research* 58, 141-152.
43. Tietz, A., **M. Dingkuhn**. 1981. Regulation of sucrose transport in barley by the abscisic acid content of young caryopses. *Z. Pflanzenphysiol. (Int. J. Plant Physiol.)* 104, 475-479.
44. Tietz, A., **M. Dingkuhn**, M. Ludewig. 1982. Translocation of ¹⁴C carbon isotope from the cotyledons of *Helianthus* seedlings under the influence of abscisic acid. *Biochem. Physiol. Pflanzen* 177, 86-91.
45. Tietz, A. M. Ludewig, **M. Dingkuhn**, K. Dorffling. 1981. Effect of abscisic acid on the transport of assimilates in barley. *Planta* 152, 557-561.
46. Tivet, F., B. da Silveira Pinheiro, M. de Raïssac and **M. Dingkuhn**. 2001. Leaf Blade Dimensions of Rice (*Oryza sativa* L. and *Oryza glaberrima* Steud.). Relationships between Tillers and Main Stem. *Annals of Botany* 88, 507-511.
47. Turner, N.C., J.O. O'Toole, R.T. Cruz, E.B. Yambao, S. Ahmad, O.S. Namuco, **M. Dingkuhn**. 1986. Responses of seven diverse rice cultivars to water deficits: II. Osmotic adjustment, leaf elasticity, leaf extension, leaf death, stomatal conductance and photosynthesis. *Field Crops Res.* 13, 273-286.

Revues à comité de relecture (articles soumises à publication)

48. Clerget B, **Dingkuhn M**, Chantereau J, Vaksman M, Hemberger J, Sidibe M. Panicle initiation in tropical sorghum depends on day-to-day change in photoperiod Field Crops Res. (submitted 2002)
49. Craufurd PQ, Hauser IE **Dingkuhn M**. Photothermal responses of *O. sativa* and *O. glaberrima* varieties and interspecific progenies from West Africa. Annals of Botany (accepted 4/2003)
50. **Dingkuhn, M.**, A. Sow, K. Etienne, N. van de Giesen. A simple model for transpiration and evapotranspiration of upland rice canopies. Agric. Syst. (submitted 1998).
51. **Dingkuhn, M.**, A. Sow. Effects of Tropical-Arid Climate on Irrigated Rice. I. Growth and Yield Responses to Variable Temperatures. Agric. Syst. (submitted 1998).
52. **Dingkuhn, M.**, M.C. Wopereis, A. Sow. Effects of Tropical-Arid Climate on Irrigated Rice. II. Simulation of the Spatial and Temporal Variation of Potential Yields in the Sahel. Agric. Syst. (submitted 1998).
53. Tivet F, da Silvera Pinheiro B, de Raissac M, **Dingkuhn M**. Leaf area dynamics and components of three rice cultivars (*Oryza sativa* L. and *Oryza glaberrima* Steud.) under drought. Field Crops Res. (submitted 2000)
54. Tivet F, de Raissac M, da Silvera Pinheiro B, **Dingkuhn M**. Leaf appearance and extension rates on three rice cultivars (*Oryza sativa* L. and *O. glaberrima* Steud.) as affected by crop development stage and environment. Field Crops Res. (submitted 2000)
55. Tivet F, de Raissac M, **Dingkuhn M**. Simulation of growth effects on morphogenesis in rice (*Oryza sativa* L. and *O. glaberrima* Steud.) during vegetative development under different levels of drought. Field Crops Res. (submitted 2000)

Chapitres dans des ouvrages

56. **Dingkuhn, M.**, F.W.T. Penning de Vries, S.K. De Datta, H.H. van Laar. 1991. Concepts for a new plant type for direct seeded flooded tropical rice. In: Direct Seeded Flooded Rice in the Tropics. International Rice Research Institute, P.O. Box 933, Manila, Philippines, 17-38.
57. **Dingkuhn, M.**, F.W.T. Penning de Vries. 1993. Improvement of rice plant type concepts: systems research enables interaction of physiology and breeding. In: Systems Approaches for Agricultural Development. F.W.T Penning de Vries et al. (Ed.). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 9-35
58. **Dingkuhn, M.**, M. Kropff. 1996. Rice. In: Photoassimilate distribution in plants and crops: Source-sink relationships. E. Zamski and A.A. Schaffer (Eds.). Marcel Dekker, Inc. Publishers. 519-547.
59. **Dingkuhn, M.**, A. Sow. 1997. Potential yield of irrigated rice in African arid environments. In: M.J. Kropff, P.S. Teng, P.K. Aggarwal, J. Bouma, B.A.M. Bouman, J.W. Jones and H.H. van Laar (Eds.). Application of Systems Approaches at the Field Level, Vol. 2. Kluwer Academic Publishers (Dordrecht / Boston / London), ISBN 0-7923-4287-9. pp. 79-99.
60. **Dingkuhn, M.**, M.P. Jones, B. Fofana, A. Sow. 1997. New high-yielding, weed competitive rice plant types drawing from *O. sativa* and *O. glaberrima* gene pools. In: M.J. Kropff, P.S. Teng, P.K. Aggarwal, J. Bouma, B.A.M. Bouman, J.W. Jones and H.H. van Laar (Eds.). Application of Systems Approaches at the Field Level, Vol. 2.

Kluwer Academic Publishers (Doordrecht / Boston / London), ISBN 0-7923-4287-9. pp. 37-52.

61. Samba A, Sarr B, Baron C, Gozé E, Maraux F, Clerget B, **Dingkuhn M.** 2001. La prévision agricole à l'échelle du Sahel. In: Malézieux E, Trébuil G, Jaeger M (Eds.). Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision. Cirad and INRA, Montpellier, France, p. 243-262.

Ouvrages rédigés ou édités

62. Miezán, K.M., M.C.S. Wopereis, **M. Dingkuhn**, J. Deckers, T.F. Randolph (Eds.). 1997. Irrigated Rice in the Sahel: Prospects for Sustainable Development. West Africa Rice Development Association, Bouaké, Côte d'Ivoire. ISBN No. 92 9113 1091. 487 pp.
63. Jones, M.P., **M. Dingkuhn**, D.E. Johnson, S.O. Fagade (Eds.). 1997. Interspecific Hybridization: Progress and Prospects. West Africa Rice Development Association, B.P. 2551, Bouaké 01, Côte d'Ivoire. ISBN 929113113X. 231 p.

Articles complets apparus dans des proceedings

64. Asch, F., **M. Dingkuhn**, K. Doerffling. 1997. Physiological stresses of irrigated rice caused by soil salinity in the Sahel. In: K.M. Miezán, M.C.S. Wopereis, M. Dingkuhn, J. Deckers and T.F. Randolph (Eds.). Irrigated Rice in the Sahel: Prospects for Sustainable Development. West Africa Rice Development Association, B.P. 2551, Bouaké 01, Côte d'Ivoire, ISBN 92 9113 1091. pp. 247-274.
65. Asch, F., **M. Dingkuhn**, M.C.S. Wopereis, K. Doerffling, K. Miezán. 1997. A conceptual model for sodium uptake and distribution in irrigated rice. In: M.J. Kropff, P.S. Teng, P.K. Aggarwal, J. Bouma, B.A.M. Bouman, J.W. Jones and H.H. van Laar (Eds.). Application of Systems Approaches at the Field Level, Vol. 2. Kluwer Academic Publishers (Doordrecht / Boston / London), ISBN 0-7923-4287-9. pp. 201-217.
66. **Dingkuhn, M.** 1994. Systems research at WARDA. In: Opportunities, Use, and Transfer of Systems Research Methods in Agriculture to Developing Countries. P. Goldsworthy and F. Penning de Vries (Eds.). Kluwer Academic Publishers Dordrecht / Boston / London, 341-350.
67. **Dingkuhn, M.**, P.Y. Le Gal, J.C. Poussin. 1995. RIDEV: Un modèle de développement du riz pour le choix des variétés et calendriers. In: Boivin, P., I. Dia, A. Lericollais, J.C. Poussin, C. Santoir, S.M. Seck (Eds.). Nianga, Laboratoire de l'Agriculture Irriguée en Moyenne Vallée du Fleuve Sénégal. Editions ORSTOM, Collection Colloques et Séminaires, Paris, France, 205-222.
68. **Dingkuhn, M.** 1996. Prospects for a sustainable intensification of rice production in West Africa. In: T. Attanandana, I. Keoruenromme, P. Pongsakul and T. Vearasilp (Eds.). Maximizing Sustainable Rice Yields Through Improved Soil and Environmental Management. Proceedings of the International Symposium Nov. 11-17, 1996, Khon Kaen, Thailand. ISBN 974-77-79-1. 409-416.
69. **Dingkuhn, M.** 1997. Characterizing irrigated rice environments using the rice phenology model RIDEV. In: K.M. Miezán, M.C.S. Wopereis, M. Dingkuhn, J. Deckers and T.F. Randolph (Eds.). Irrigated Rice in the Sahel: Prospects for

- Sustainable Development. West Africa Rice Development Association, B.P. 2551, Bouake 01, Cote d'Ivoire, ISBN 92 9113 1091. 343-360.
70. **Dingkuhn, M.**, A. Sow. 1997. Potential yields of irrigated rice in the Sahel. In: K.M. Miezán, M.C.S. Wopereis, M. Dingkuhn, J. Deckers and T.F. Randolph (Eds.). Irrigated Rice in the Sahel: Prospects for Sustainable Development. West Africa Rice Development Association, B.P. 2551, Bouake 01, Cote d'Ivoire, ISBN 92 9113 1091. 361-380.
 71. **Dingkuhn, M.**, K.M. Miezán. 1997. Photothermal adaptations of rice genotypes in the Sahel. In: K.M. Miezán, M.C.S. Wopereis, M. Dingkuhn, J. Deckers and T.F. Randolph (Eds.). Irrigated Rice in the Sahel: Prospects for Sustainable Development. West Africa Rice Development Association, B.P. 2551, Bouake 01, Cote d'Ivoire, ISBN 92 9113 1091. 327-342.
 72. **Dingkuhn, M.**, T.F. Randolph. 1997. The potential role of low-management rice technologies during the agricultural transition in West Africa. In: Interspecific Hybridization: Progress and Prospects. M.P. Jones, M. Dingkuhn, D.E. Johnson and S.O. Fagade (Eds.). West Africa Rice Development Association, B.P. 2551, Bouake 01, Cote d'Ivoire. ISBN 929113113X. 3-20.
 73. Dingkuhn, M., D.E. Johnson, M.P. Jones, A. Sow. 1997. The physiological basis for developing low-management upland rice plant types. In: Interspecific Hybridization: Progress and Prospects. M.P. Jones, M. Dingkuhn, D.E. Johnson and S.O. Fagade (Eds.). West Africa Rice Development Association, B.P. 2551, Bouake 01, Cote d'Ivoire. ISBN 929113113X. 81-102.
 74. **Dingkuhn, M.**, M.P. Jones, D.E. Johnson, B. Fofana A. Sow. 1997. *Oryza sativa* and *O. glaberrima* gene pools for high-yielding, weed-competitive rice plant types. In: S. Fukai, M. Cooper and J. Salisbury (Eds.). Breeding Strategies for Rainfed Lowland Rice in Drought-Prone Environments. ACIAR Proceedings No. 77. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, Australia, 1997. 248 pp.
 75. **Dingkuhn M.**, Tivet F, Siband P, Asch F, Audebert A, Sow A. 2001. Varietal differences in specific leaf area: a common physiological determinant of tillering ability and early growth vigor? In: Peng S, Hardy B (Eds). Rice Research for Food >Security and Poverty Alleviation. Proc. Intl. Rice Res. Conf., April 2000., International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, 95-108.
 76. Johnson, D.E., M.P. Jones, **M. Dingkuhn**, M.C. Mahamane. 1997. The effect of weed competition on cultivars of *O. glaberrima*, *O. sativa* and an interspecific hybrid rice. In: Interspecific Hybridization: Progress and Prospects. M.P. Jones, M. Dingkuhn, D.E. Johnson and S.O. Fagade (Eds.). West Africa Rice Development Association, B.P. 2551, Bouake 01, Cote d'Ivoire. ISBN 929113113X. Pp. 197-211.
 77. Johnson, D. E.; Jones, M. P.; **Dingkuhn, M.**, Mahamane, M. C. 1997. The response of *O. glaberrima*, *O. sativa* and an interspecific hybrid rice cultivar to weed competition. In: Proc. Brighton crop protection conference: weeds. Brighton, UK, November 1997., Vol. 1, 197-202.
 78. **Jones, M. P.; Dingkuhn, M.**; Aluko, G. K.; Semon, M. 1996. New breeding approaches for upland rice improvement: the use of *Oryza sativa*/*O. glaberrima* crosses. In: Piggin, C.; Courtois, B.; Schmit, V. (Eds.). Proc. Upland Rice Consortium Workshop, Padang, Indonesia, January 1996. International Rice Research Institute. 274-283.
 79. Jones, M.P., **M. Dingkuhn**, G.K. Aluko M. Semon. 1997. Using backcrossing and doubled-haploid breeding to generate weed competitive rices from *O. sativa* x *O. glaberrima* Steud. gene pools. In: Interspecific Hybridization: Progress and Prospects. M.P. Jones, M. Dingkuhn, D.E. Johnson and S.O. Fagade (Eds.). West Africa Rice

- Development Association, B.P. 2551, Bouake 01, Cote d'Ivoire. ISBN 929113113X. 61-80.
80. Roveda-Hoyos, G.; Chopart, J. L.; Baquero, J. E.; Rojas, L. A.; **Dingkuhn, M.** 2001. Modeling growth and distribution of maize (*Zea mays* L.) roots under field conditions in the eastern plains of Colombia. In: Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research. 14th International Plant Nutrition Colloquium, Hannover, Germany. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. IS: 0-7923-7105-4, 576-577.
 81. Van de Giesen, N., A. Sow, **M. Dingkuhn**, A. Euloge. 1997. Transformation des systèmes de culture rizicoles inondés en systèmes hydromorphiques: Economies potentielles de l'eau dans les petits systèmes d'irrigation en zone de savane Ouest Africaine. In: Atelier du Consortium Bas-Fonds B Sikasso, Mali.
 82. Tietz, A., **M. Dingkuhn**, M. Ludewig, K. Dorffling. 1983. Effect of abscisic acid on transport and storage of assimilates in *Helianthus annuus*, sunflower, and *Hordeum vulgare*, barley. In: Photosynthesis and plant productivity. Proc. of Joint Meeting of OECD, Stuttgart 1981. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 182-185.